JANUARR 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> Seltsame Mikrofluide
> Gebrüder Wright: Erstflug vor hundert Jahren
> Wasser auf dem Mars?
> Gerechtigkeitssinn bei Affen
> Impfen gegen Alzheimer?

www.spektrum.de

HIRNFORSCHUNG

Warum wir schlafen

Neurowissenschaftler sind dabei, ein altes Rätsel zu lösen

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €

ASTRONOMIE

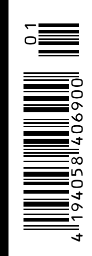
Unerwartet junge Kugelsternhaufen

KINDERARBEIT

Ein Ende der Ausbeutung?

MAYAS

Wann verging ihre Kultur wirklich?





Reinhard Breuer
Chefredakteur

Schlaflos allein zu Haus

Haben Sie gut geschlafen? Ich frage das nicht nur aus Höflichkeit. Denn schlechter Schlaf oder gar chronische Schlaflosigkeit belasten allzu viele von uns. Wenn laut Studien rund 2,7 Millionen Menschen in Deutschland regelmäßig zu Schlafmitteln greifen (so die Deutsche Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin), dann ist Schlafmangel ein Massenphänomen. Breit angelegte Untersuchungen haben jedenfalls gezeigt: Schlafstörungen sind viel weiter verbreitet als bislang angenommen, und die meisten dieser Störungen sind chronischer Natur. Ob Insomnien (Ein- oder Durchschlafstörungen), Schlafapnoen (nächtlicher Atemstillstand) oder Narkolepsien (Tagesschläfrigkeit) – Schlafstörungen werden häufig nicht richtig diagnostiziert oder falsch therapiert. Warum wir überhaupt schlafen, ist dabei selbst ein Rätsel, das noch keineswegs restlos gelöst ist. Immerhin können Schlafforscher inzwischen mit einer Reihe gesicherter Erkenntnisse aufwarten (Seite 30).

»Schlafstörungen werden häufig falsch diagnostiziert oder falsch therapiert«

Manche mögen empört auf den Umgang mit einem deprimierenden Thema reagieren: Unser Autor Kaushik Basu versucht dem weltweiten Problem der Kinderarbeit auf neue Art beizukommen. Der amerikanische Sozialökonom empfiehlt den betroffenen Ländern Maßnahmen, welche die wirtschaftliche Situation der Eltern dieser Kinder verbessern, ohne zunächst die Kinderarbeit selbst zu ächten oder zu verbieten. Das mag zynisch klingen, aber das Gegenteil ist der Fall. Gut gemeinte staatliche Verbote haben den ausgebeuteten Kindern nämlich bislang eher geschadet als geholfen. Zwar wurden sie von der Arbeit befreit, aber sie landeten danach unverzüglich in der Prostitution oder ihre Familien stürzten in noch größeres Elend. Der Grund: Eltern treiben ihre Kinder nicht aus Hartherzigkeit oder Gleichgültigkeit in die Fronarbeit, sondern aus bitterer Not. Eine kluge Kombination aus Gesetzgebung und ökonomischem Anreiz scheint dem Problem eher beizukommen (S. 70).

Falls Sie in dieser Ausgabe die Rubriken »Forschung und Gesellschaft« oder »Wissenschaft im Internet« vermissen, so ist das kein Zufall. Ab diesem Heft werden die besten Beiträge daraus in anderen Rubriken erscheinen. Gleichzeitig erhöhen wir die Zahl unserer Hauptartikel – damit Spektrum für Sie thematisch noch vielfältiger und attraktiver wird.



PS: Unser neues Spektrum-Spezial »Omega« trägt den Untertitel »Das Magazin für Mathematik, Logik und Computer«. Damit bieten wir ein Magazin für alle, die etwa »Mathematische Unterhaltungen« schätzen, aber auch die Rätsel der Graphen- oder Zahlentheorie. Übrigens: Mit »Omega« bezeichnen manche Mathematiker die »kleinste unendliche Zahl«.

INHALT

JANUAR 2004

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Auch wenn wir im Schlaf unsere Umwelt nicht bewusst wahrnehmen und das Ich die Herrschaft über unser Tun ausgesetzt hat, steht das Räderwerk des Geistes keineswegs still.

Bild: Corbis / Janet Atkinson



SEITE 24

GALAXIEN

Kugelsternhaufen in neuem Licht

Die kompakten Ansammlungen aus Abertausenden oder gar Millionen Sternen galten lange als die Greise des Universums. Doch viele Kugelsternhaufen sind überraschend jung. Sie entstehen, wenn Galaxien kollidieren.



SEITE 38

PLANKTON

Die Kunst, sich nicht fressen zu lassen

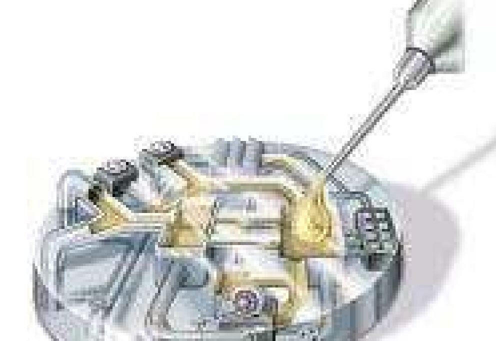
Ein verborgenes biologisches Wettrüsten im Wasser offenbart sich den Forschern im Mikroskop – und es erklärt ihnen die enorme Formenvielfalt der winzigen Plankton-Organismen.

SEITE 46

MIKROSYSTEMTECHNIK

Verrückte Fluide

Wenn Kanäle und Ventile in den Mikrokosmos schrumpfen, spielen Gase und Flüssigkeiten verrückt, strömen von kalt nach warm und stören sich an rauen Wänden.

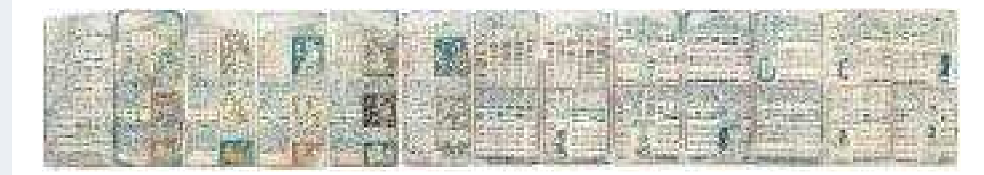


SEITE 52

ARCHÄOASTRONOMIE

Das Rätsel des Mayakalenders

Müssen wir die Datierung der Mayakultur um 208 Jahre verschieben? Der Dresdener Codex und andere astronomische Aufzeichnungen, die uns das mesoamerikanische Volk hinterlassen hat, deuten darauf hin.



SEITE 60

MEDIZIN

Das Rätsel der Huntington-Chorea

Das Gen für diese tödliche Erbkrankheit ist seit zehn Jahren entziffert. Was aber sein Protein eigentlich im Körper anrichtet und wie dem zu begegnen wäre, beginnen die Forscher erst jetzt zu durchschauen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

TITELTHEMA HIRNFORSCHUNG

Warum wir schlafen

SEITE 30

Jeder Mensch braucht Schlaf. Aber wozu? Neurowissenschaftler sind dabei, dieses alte Rätsel zu lösen.

SEITE 70

WIRTSCHAFT

Die Ökonomie der Kinderarbeit

Millionen Kinder schuften als billige Arbeitskräfte. Aber Verbieten allein – ohne Rücksicht auf wirtschaftliche Rahmenbedingungen – bringt nichts.



SEITE 78

INFORMATIK

Die Evolution der Kettenbriefe

Ein neues Verfahren findet Verwandtschaften unter den verschiedensten Dingen: Genomen, Sprachen, Hausaufgaben – und Kettenbriefen.

SEITE 84

TECHNIKGESCHICHTE

Der zwiespältige Erfolg der Brüder Wright

Vor hundert Jahren bauten die beiden das erste steuerbare Motorflugzeug. Aus Furcht vor der Konkurrenz hielten sie ihre Erfindung geheim – und setzten ihren Ruhm aufs Spiel.



REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTARE

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Fragen an das Orakel von Delphi

Ein interdisziplinäres Forscherteam fand das Gas, das die Apollon-Priesterin zum Weissagen brauchte.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

LESERBRIEFE

Innovation in Deutschland

November 2003

Brücke zur Zukunft Bayerns wird eingerissen

Als ich die Beiträge zum Sonderteil las – ich studiere an der LMU München –, wirkten diese auf mich sehr surreal. Wird dort doch zu Recht gefordert, den Standort Deutschland durch bessere Ausbildung und mehr Innovation zu fördern. Auf der anderen Seite habe ich am Tag zuvor erfahren, dass die bayerische Staatsregierung zehn Prozent der Mittel für Universitäten streichen will und die LMU aufgefordert hat, innerhalb des nächsten Jahres 25 Millionen Euro einzusparen. Der Rektor der Universität sah sich daher gezwungen, einen absoluten Einstellungsstopp zu verhängen. Dies betrifft alle. Offene Lehrstühle werden auf absehbare Zeit nicht wieder neu besetzt, keine neuen Hilfskräfte zum Betreuen von Praktika oder Korrigieren von Übungsblättern eingestellt.

Damit wird eine wichtige Brücke zur Zukunft Bayerns und Deutschlands eingerissen.

Markus Schmaus, München

Kluge Köpfe mit dürftiger Ausstattung erzielen

Ihr Panorama über »Innovation in Deutschland« darf ich um eine Information bereichern, welche die Hochschätzung illustrieren mag, die innerhalb des Themas die Schulbildung und hierbei die naturwissenschaftliche Lehrerbildung besitzen: Im Fach »Didaktik der Physik« an der Universität Hamburg belief sich der im Jahre 2003 zur Verfügung stehende Geräteetat auf ungefähr 700 Euro. Die Bedeutung dieses ungeheuren Betrages werde deutlich beim Vergleich mit jenem zu Beginn meiner Hamburger Tätigkeit 1976: von den damaligen (ebenfalls schon unzulänglichen) 12000 DM (inflationsbereinigt entspricht dies zirka 20000 DM) sind danach gerade noch sieben Prozent übrig geblieben.

Gelächter darf sich erheben, hört man den Hamburger Wissenschaftssenator tönen, dass seine Hochschulen mit solcher Ausstattung im »weltweiten Wettbewerb um die besten Köpfe« siegreich bestehen sollen, einem Ziel, zu dem überdies die Hochschulstrukturen »reformiert«, das heißt zerschlagen werden müssen, die bisher trotzdem noch einigermaßen erfolgreich gearbeitet haben.

Prof. Peter Klein, Hamburg


ALFRED T. KAMAJIAN

▲ Aus der Theorie Schwarzer Löcher folgern Forscher, dass das Universum einem Hologramm ähnelt.

Das holografische Universum

November 2003

Die Physiker stehen nun wohl vor der Aufgabe, festzustellen, ob das holografische Modell denn auch die Symmetriebrechungen und in ihrem Gefolge emergente Eigenschaften und kosmische Evolution zulässt. Aus der Sicht des Biologen wird es noch spannender: Er spricht von einer hartnäckigen Einbildung und erinnert sich daran, dass, im Gegenteil, Konrad Lorenz und seine Schüler gezeigt haben, wie unsere drei- beziehungsweise vierdimensionale Sicht durch das Leben selbst aus seiner Umgebung extrahiert worden ist. Nun fragt er sich, wie die Leben rettende Mustererkennung, die ihn rechtzeitig vor Schlangen und Löwen, Gegenverkehr und anderen Gefahren warnt, im neuen Modell »verwirklicht« sein könnte. Zusammengefasst: Wer die Physik hat, hat noch nicht die ganze Welt.

Dr. Siegfried Stephan, Rheinbach

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. (06221) 9126-711, Fax (06221) 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (06221) 9126-600, Fax (06221) 9126-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 4303, Fax (02244) 6383, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 9083357, Fax (0211) 9083358, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 9126-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Sabrina Serbource, Roberta Veglio.

Leser- und Bestellservice: Tel. (06221) 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (06201) 6061-50, Fax (06201) 6061-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-2379, Fax (0211) 887-2399; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-2376, Fax (0211) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (030) 61686150, Fax (030) 6159005, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (040) 30183/-183/-194, Fax (040) 339090; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 30135-2060, Fax (0211) 133974; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (069) 2424-4536, Fax (069) 2424-4555; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22475-40, Fax (0711) 22475-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (089) 545907-14, Fax (089) 545907-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-2387, Fax (0211) 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.

Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

Streit um Deutung des ältesten Original-Schriftstücks Europas

Forschung aktuell, November 2003

Es ist überaus erfreulich, dass Sie auch geisteswissenschaftlichen Entdeckungen Raum geben. Ärgerlich jedoch ist, wenn dabei Legenden von einem Philologenstreit, gar von einem tiefen Graben und mangelnder Kooperation der deutschen Altertumsforscher in die Welt gesetzt werden. Im Fall des Derveni-Papyrus hat die Freundschaft der Papyrologen von Anfang an eine Rolle gespielt, und zwar international. Das Original befindet sich in Thessaloniki; eine Edition haben die dortigen Kollegen bis heute nicht vorgelegt. Der 1982 veröffentlichte Text beruht auf einer Abschrift, die ein Kollege aus Thessaloniki einem englischen Papyrologen mitgebracht hatte; dass zuvor ein paar Bruchstücke durch einen Engländer im Museum Thessaloniki von Hand abgeschrieben worden waren, wurde damit gegenstandslos. Die Abschrift aus Thessaloniki wurde xerokopiert und zirkulierte dann unter Freunden. Ich schlug dem Herausgeber der »Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik« vor, den Text abzudrucken, was 1982 geschah. Auf diese Weise ist seitdem der Großteil des Textes allen Wissenschaftlern zugänglich.

Die internationale Zusammenarbeit ging weiter bis zu jener Konferenz von Princeton 1993, an der auch Kyriakos Tsantsanoglou, Thessaloniki, teilnahm; er brachte zusätzliche Teile des Textes mit. Richard Janko hat jetzt in sehr sorgfältiger Arbeit alles zusammengestellt, was von dem Text bekannt ist. Dies kann nur eine Zwischenlösung sein: Was immer noch fehlt, ist die eigentliche Ausgabe des Textes, mit Fotos, durch die Kollegen von Thessaloniki.

Prof. Walter Burkert, Uster, Schweiz

Warum Ordnung keinen Sinn mehr macht

Am Rande, November 2003

Ich kann die Beobachtungen von Herrn Groß durchaus bestätigen, werde aber trotzdem meine Zettel weiter sammeln. Die Erfahrung aus anderen Bereichen zwingt hochzurechnen, dass in dem Moment, wo sich das Suchen im Netz als Standard etabliert und niemand mehr seinen persönlichen Zettelkasten besitzt, die Geldgier siegt und das Herunterladen aus Archiven unbezahlbar wird. Einige deutsche Tageszeitungen gehen hier bereits mit unrühmlichem Beispiel voran. Und wenn die Meldungen (die neulich durch die Agenturen gingen) stimmen, dass Microsoft Google übernehmen will, sind die Zeiten des kostenlosen Suchens auch vorbei.

Wolfgang Kehren, Bonn

Sehtraining bei Teilblindheit

September 2003

Kasten und Sabel berichten, dass sich Gesichtsfelddefekte verkleinern ließen, wenn im Grenzbereich zwischen funktionstüchtigem und blindem Gebiet mit Lichtpunkten – auf einem Computerbildschirm dargeboten – über 150 Stunden gereizt werde. Sie stützen sich dabei vor allem auf eine Studie, die sie selbst in »Nature Medicine« (4, 1998) veröffentlicht haben. Diese Arbeit stieß auf Widerspruch, zum Beispiel in »Z. Neuropsychol.« (11, 2000). Eingewandt wurde u. a., dass die Besserung zumindest teilweise durch eine unstabile Fixation während der Nachuntersuchung vorgetäuscht worden sein könnte. Inzwischen gibt es eine Folgestudie (www.bielschowsky.de/tagungen/2002/tagung9.php), für die 17 Patienten mit Sehbahnschäden von der Tübinger Universitäts-Augenklinik ausgewählt wurden. An der Universität Magdeburg wurde für jeden Patienten ein individuelles Behandlungsprogramm nach den Prinzipien von Kasten und Sabel erstellt. Die Nachuntersuchung erfolgte in Tübingen. Die aus den Befunden gezogenen Schlussfolgerungen waren unterschiedlich: Während die Magdeburger eine Verkürzung der »Reaktionszeit« von 435 auf 409 Millisekunden und eine Verbesserung der »subjektiven Sehleistung« hervorhoben (Sabel et al.), stuften die Tübinger eine Rückbildung der Gesichtsfeldausfälle als »selten oder gering« ein (Schreiber et al.) und fanden an einem Gerät, das eine genaue Fixationskontrolle erlaubt (Scanning-Laser-Ophthalmoskop), praktisch keine Änderung der absoluten Gesichtsfeldausfälle (Reinhard et al.).

In Anbetracht der vorliegenden Daten halte ich den Wert des empfohlenen Trainings für äußerst fragwürdig. Man sollte den Patienten eher beibringen, ihr Restgesichtsfeld durch Blickbewegungen zu nutzen, und zwar angepasst an typische Anforderungen des täglichen Lebens, wie das Lesen oder das Überqueren einer Straße.

Prof. G. Kommerell, Freiburg

Lasergetriebene Wasserpistole

Forschung aktuell, Oktober 2003

Der Autor dieses Beitrags muss im Physikunterricht gefehlt haben, als der Zusammenhang Kraft = Masse × Beschleunigung erläutert wurde. Er hätte sonst nicht als Erklärung für die schmerzliche Erfahrung, die man beim Aufprall auf das Wasser nach einem Bauchplatscher macht, die Oberflächenspannung angeführt. Sie dürfte verschwindend klein im Verhältnis zur Reaktionskraft des plötzlich verdrängten Wassers sein.

Peter Kayser, Sereetz

▼ Diese Fragmente des Papyrus Derveni zeigen eine der am besten erhaltenen Stellen.



16: EPHOREIA PROISTRIKON KAI KLASIKON ARCHAIOTETON

ASTRONOMIE

Neuer himmlischer Nachbar

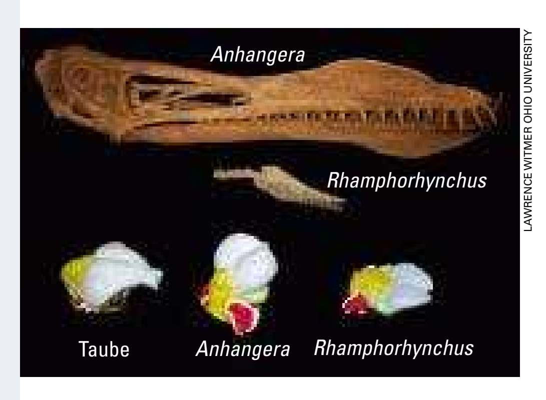
Manchmal übersieht man das Nächstliegende. Das gilt auch für Astronomen. So hielten sie lange die Große Magellansche Wolke für den nächsten Nachbarn der Milchstraße – bis 1994 die Sagittarius-Zwerggalaxie entdeckt wurde. Doch jetzt fand ein internationales Astronomenteam im Sternbild Großer Hund ein kleines Sternsystem, das uns noch näher liegt. Es rotiert im Abstand von nur 42 000 Lichtjahren um das Zentrum der Milchstraße und ist fast in deren Scheibe eingebettet. Dichte Staubwolken hatten den Blick darauf bisher versperrt. Erst bei der kürzlich komplettierten 2MASS-Himmelsdurchmusterung im infraroten Spektralbereich, in dem Staub durchsichtig ist, tauchte der übersehene Begleiter plötzlich auf. »Es ist, als würde man eine Infrarot-Nachtsichtbrille aufsetzen«, sagt Rodrigo Ibata vom Observatorium Straßburg. Erkennbar wird das fremde Sternsystem vor allem in der Verteilung Roter Riesen-Sterne, in der sein Körper als Dichtekonzentration erscheint. Allerdings hat die Milchstraße mit ihrem örtlich variablen Gravitationsfeld schon kräftig an ihm gezerrt und dabei »Gezeitenarme« herausgerissen, die sich nun wie wehende Bänder um sie wickeln. Und so wird es auch nicht mehr lange dauern, bis die Zwerggalaxie völlig verschluckt ist. *(Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, im Druck)*



PALÄONTOLOGIE

Blick ins Gehirn von Flugsauriern

Vor den Vögeln waren Flugsaurier die Herrscher der Lüfte. Aber wie gut konnten sie wirklich fliegen? Anhaltspunkte lieferte bisher nur ihre Anatomie. Doch Aerodynamik ist nicht alles, eine ausgeklügelte Flugsteuerung muss hinzukommen – und die sitzt im Gehirn. Paläontologen um Lawrence Witmer von der Ohio-Universität in Athens untersuchten deshalb gut erhaltene Schädelfossilien von zwei Pterosaurier-Arten: *Rhamphorhynchus muensteri* aus den Solnhofener Plattenkalken und *Anhanguera santanae* aus Brasilien. Ersterer war mit einer Körperlänge von neunzig Zentimetern relativ klein, während der zweite eine Spannweite von über vier Metern erreichte. Mit der aus der Medizin bekannten Computertomografie ermittelten Witmer und seine Kollegen jeweils das genaue dreidimensionale Knochengerüst des Schädels und gewannen daraus ein Abbild des Gehirns, indem sie einen virtuellen Ausguss im Rechner erzeugten. Dabei erwies sich, dass ein stammesgeschichtlich sehr altes Areal des Kleinhirns besonders viel Raum einnahm: der so genannte Flocculus. Er verarbeitet Informationen über die Lage des Körpers im Raum und über die Stellung von Kopf, Nacken und Augen. Das Gleichgewichtsorgan war gleichfalls sehr kräftig ausgebildet. Beide Areale sind wichtig für die Navigation im Flug und auch bei den Vögeln deutlich größer als etwa bei Säugetieren oder heutigen Reptilien. Bei den Flugsauriern lag ihr Anteil an der gesamten Gehirnmasse sogar noch um einiges höher. Dies lässt vermuten, dass die Tiere trotz eines insgesamt kleineren Gehirns exzellente Flieger waren. *(Nature, 30.10.2003, S. 950)*



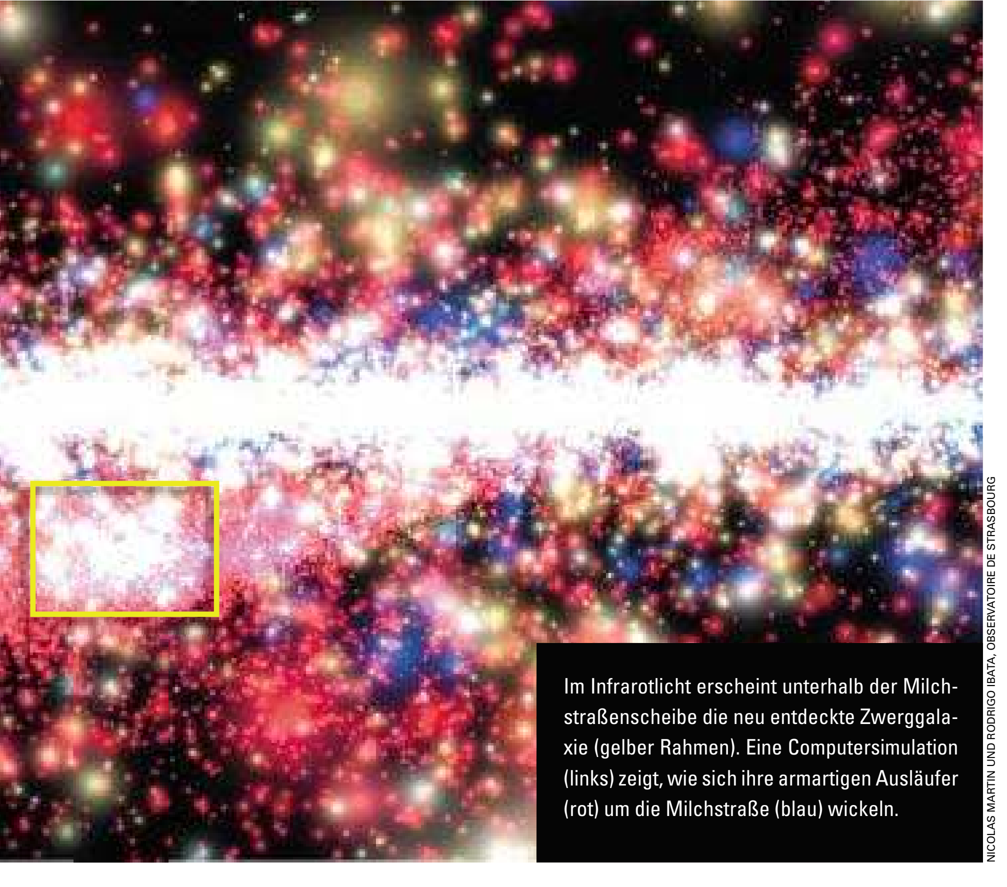
LAWRENCE WITMER OHIO UNIVERSITY

◄ Im Gehirn von Flugsauriern sind das Gleichgewichtsorgan (grün) und der Flocculus (rot) noch größer als bei Vögeln.

PHYSIOLOGIE

Diktat der Hormone

Nun ist es auch wissenschaftlich erwiesen: Männer sind die Sklaven ihrer Hormone. Forscher um James R. Roney von der Universität Chicago baten 18 bis 36 Jahre alte Studenten zum Speicheltest – angeblich um den Zusammenhang zwischen Wohlbefinden und Hormonspiegel zu untersuchen. Was die arglosen Versuchskaninchen nicht wussten: Die Laborassistentin, die zwischen zwei Messungen kurz mit ihnen sprach, war nicht aus Zufall jung und hübsch. Vielmehr wurden die Männer absichtlich mit einer attraktiven Frau konfrontiert. Das Ergebnis war denn auch eindeutig: Der Plausch mit der Assistentin ließ den Testosteron-Spiegel emporschießen. Zudem plusterten sich die Männer erkennbar auf und suchten Eindruck zu schinden. Am meisten taten sich dabei jene mit dem stärksten Hormonanstieg hervor. Sie konnten sich auf Nachfrage auch am besten vorstellen, eine Liebesbeziehung mit der Assistentin einzugehen. Für die Forscher zeigt das, dass sich Männchen der Spezies Mensch – Zivilisation hin, Moral her – im Balzverhalten nicht von ihren Geschlechtsgenossen bei anderen Säugern unterscheiden. *(Evolution of Human Behavior, Bd. 24, S. 365)*



Im Infrarotlicht erscheint unterhalb der Milchstraßenscheibe die neu entdeckte Zwerggalaxie (gelber Rahmen). Eine Computersimulation (links) zeigt, wie sich ihre armartigen Ausläufer (rot) um die Milchstraße (blau) wickeln.

NICOLAS MARTIN UND RODRIGO IBATA, OBSERVATOIRE DE STRASBOURG

VERHALTEN

Klassenbewusste Paviane

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Je beliebter die Mutter, desto gesünder die Kinder – jedenfalls bei afrikanischen Pavianen

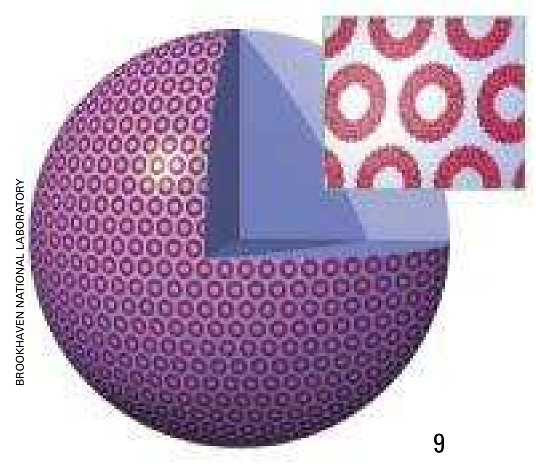
Gesellig lebende höhere Tiere haben eine ausgeprägte soziale Rangordnung, in der jeder seine eigene Position genau kennt. Aber wie gut wissen einzelne Gruppenmitglieder über die relative Stellung der anderen Bescheid? Robert Seyfahrt und seine Mitarbeiter an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia haben dies jetzt mit einem originellen Test untersucht. Sie spielten Pavianweibchen per Lautsprecher einen vorgetäuschten Streit zwischen zwei anderen Weibchen aus ihrer Gruppe vor. Bei solchen Auseinandersetzungen stößt das dominante Tier drohende Grunzer aus, während das rangniedere schreit. In dem Versuch reagierten die lauschenden Pavianweibchen um so überraschter, je weniger der simulierte Streit den Erwartungen entsprach: Triumphierte ein sozial niedriges Tier über ein ranghöheres, blickten sie länger in Richtung der Lautsprecher als im umgekehrten Fall. Am größten war ihre Irritation, wenn ein Weibchen aus einer hoch stehenden Familie einem aus einer nachgeordneten Sippe unterlag. »Die Tiere müssen scharfsinnige Beobachter sein, um das soziale Miteinander ihrer Genossen so wahrzunehmen, dass sie daraus die sozialen Strukturen ihrer Gruppe ableiten können«, kommentiert Seyfahrt das Ergebnis. In einer anderen Untersuchung zeigten Raymond A. Pagliarini und Tian Xu von der Yale Universität in New Haven (Connecticut), dass die Chance von Pavianjungen, das erste Lebensjahr zu vollenden, mit der sozialen Integration ihrer Mutter in die Gruppe steigt. *(Science, 14.11.2003, S. 1231 und 1234)*

CHEMIE

Hohlkugel aus Riesenrädern

Für chemische Verhältnisse ist das Gebilde gigantisch: Mit 90 Nanometern Durchmesser reicht es an die Größe von Bakterien heran. Doch es ist im Aufbau rein anorganisch. Seine Bestandteile sind 3,6 Nanometer große ringförmige »Polyoxomolybdate«, die Achim Müller und seine Mitarbeiter an der Universität Bielefeld schon 1995 hergestellt und als Riesenräder bezeichnet hatten. Nun entdeckte die gleiche Gruppe zusammen mit US-Kollegen, dass sich in wässriger Lösung jeweils ziemlich genau 1165 solche Räder spontan zu einheitlich großen Hohlkugeln zusammenfügen. Das ist umso erstaunlicher, als die Ringe negativ geladen sind und sich deshalb abstoßen sollten. Für den Zusammenhalt sorgt offenbar Wasser, das in den engen Zwischenräumen einen eisartigen Zustand annimmt. Dadurch friert es die Räder gleichsam ein und kompensiert deren elektrostatische Abstoßung. Die Forscher sprechen von einem neuartigen Lösungszustand für anorganische Ionen. Bei organischen Stoffen sind ähnliche Hohlkugeln als »Micellen« schon länger bekannt, entstehen dort allerdings dadurch, dass die Einzelmoleküle – anders als die Riesenräder – ein wasserliebendes und -meidendes Ende haben. Ersteres strecken sie nach außen zum Lösungsmittel hin, während sie Letzteres im Inneren der Hohlkugel verstecken. *(Nature, Vol. 426, S. 60)*

▼ Etwa 1165 Riesenräder, die je 154 Molybdänatome enthalten, vereinigen sich in wässriger Lösung zu einer 90 Nanometer großen Hohlkugel.



BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

MEDIZIN

Wahl zwischen zwei Übeln

Meist lässt die Merkfähigkeit im Alter deutlich nach. Der Hauptgrund dafür ist, dass neue Informationen nicht mehr so leicht ins Langzeitgedächtnis aufgenommen werden – ein Prozess, der in einer speziellen Hirnregion namens Hippocampus stattfindet. In Einklang damit ergaben bisherige Untersuchungen, dass sich der Vergesslichkeit mit Substanzen begegnen lässt, welche die Aktivität des Enzyms Proteinkinase A (PKA) steigern; denn dessen Konzentration nimmt im Hippocampus mit dem Alter ab. Mehrere Pharmafirmen arbeiten deshalb derzeit an der Entwicklung solcher Wirkstoffe. Doch jetzt fanden Neurobiologen heraus, dass sich PKA-aktivierende Substanzen keineswegs durchweg positiv auf die geistige Leistungsfähigkeit auswirken. Wie Amy F. T. Arnsten und ihre Mitarbeiter an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) bei Versuchen an Ratten und Rhesusaffen feststellten, verschlechtern sie das so genannte Arbeitsgedächtnis. Dieses hält Informationen kurzzeitig fest und erlaubt, sie miteinander zu vergleichen oder zu kombinieren. Damit bildet es die Grundlage für unser Denken und planmäßiges Handeln. Allerdings ist es nicht im Hippocampus angesiedelt, sondern im präfrontalen Cortex, der direkt hinter den Augen liegt. Offenbar werden beim Altern die beiden Hirnregionen in gegensätzlicher Weise beeinträchtigt: Im Hippocampus nimmt die PKA-Aktivität ab, wogegen sie im präfrontalen Cortex ansteigt, weil der Mechanismus zu ihrer Hemmung zunehmend versagt. Das unspezifische Drehen an der PKA-Schraube bringt damit keine generelle Verbesserung der kognitiven Leistungsfähigkeit, sondern bietet allenfalls die Wahl zwischen zwei gleich großen Übeln. *(Neuron, 13.11.2003, S. 1)*

MATERIALFORSCHUNG

Überschallschnelle Risse



M. BUEHLER, MPI METALLFORSCHUNG

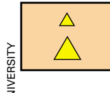
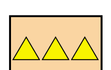
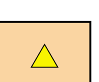
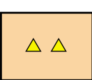
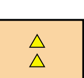
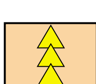
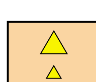
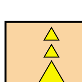
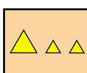
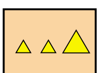
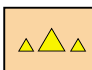
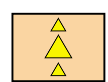
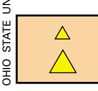
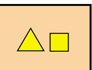
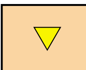
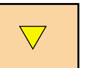
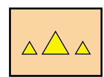
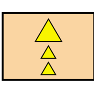
▲ Feststoffe verhalten sich in einer schmetterlingsförmigen Region vor einer vordringenden Rissspitze hyperelastisch.

Überschallgeschwindigkeit können nicht nur Flugzeuge erreichen, sondern auch Risse in Festkörpern. Das entdeckten Forscher um Markus Buehler vom Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart, als sie die molekulare Dynamik des zerreißenden Werkstoffs im Computer simulierten. Üblicherweise werden die elastischen Eigenschaften von Festkörpern als linear angenommen: Wie bei einer Sprungfeder sollte sich das Material proportional zur aufgewendeten Kraft verformen. In der Umgebung einer vordringenden Rissspitze gilt das aber nicht mehr. Hier treten so große Kräfte auf, dass sich der Festkörper hyperelastisch verhält. Dadurch werden etwa Metalle weicher und Kunststoffe härter. Unter bestimmten Umständen kann sich so der Riss in dem Material schneller ausbreiten als Schallwellen. Die Stuttgarter Forscher fanden auch heraus, warum dieses Verhalten bisher nicht beobachtet wurde. Ihren Simulationen zufolge tritt der Effekt erst auf, wenn die hyperelastische Region um die Rissspitze größer ist als der Bereich, über den sich der mit dem Riss verbundene Energiefluss erstreckt. Das trifft unter normalen experimentellen Bedingungen nicht zu, kann aber beispielsweise in nanostrukturierten Materialien wie dünnen Schichten oder bei sehr schnellen Verformungen der Fall sein. *(Nature, Vol. 426, S. 141)*

GEHIRNFORSCHUNG

Trügerische Erinnerungen

Gerichte messen den Aussagen von Augenzeugen großes Gewicht bei. Inzwischen haben jedoch viele Versuche gezeigt, wie leicht – etwa durch Suggestivfragen – falsche Erinnerungen erzeugt werden können. In der Regel ist dabei Sprache als vermittelndes Medium beteiligt. Deshalb wollte der Neurologe David Beversdorf von der Ohio State University in Columbus wissen, ob die visuelle Erinnerung an nur schwer verbalisierbare Dinge ebenso trügerisch ist. Dazu zeigte er mehreren Testpersonen Dias, auf denen eine wechselnde Anzahl geometrischer Figuren abgebildet war, die sich in Form, Farbe, Position und Größe unterschieden (Bild unten). Aus einer zweiten Bildserie sollten die Probanden später diejenigen Aufnahmen heraussuchen, die sie zuvor schon gesehen hatten. Unter die teils bekannten, teils neuen Bilder dieser zweiten Serie mischte Beversdorf einen »Köder«: ein Dia, das Elemente der anderen kombinierte, aber mit keinem davon übereinstimmte. Während die Testpersonen die bekannten Abbildungen zu 80 und die neuen sogar zu 98 Prozent korrekt zuordneten, scheiterte die Mehrzahl an diesem Köder: 60 Prozent glaubten fälschlich, ihn wiederzuerkennen. Den Grund dafür sieht Beversdorf in unserer Fähigkeit, in Zusammenhängen zu denken. Dadurch können wir uns einerseits zwar Dinge besser merken, lassen uns andererseits aber auch leicht in die Irre führen. *(Jahrestagung der Society for Neuroscience in New Orleans)*

OHIO STATE UNIVERSITY

▲ Die Versuchspersonen sollten jeweils aus fünf Bildern (unten) diejenigen bestimmen, die sie zuvor in einer Reihe von zwölf Bildern gesehen hatten (oben). Das fünfte Bild unten rechts war hier der Köder.

10 Kilometer

US GEOLOGICAL SURVEY EROS DATA CENTER

Filigraner Schwemmfächer



MODIS LAND RAPID RESPONSE TEAM / NASA / GSFC

Wie eine Bordüre aus feiner Brüsseler Spitze ragt dieser riesige, knapp sechzig Kilometer breite Schuttkegel vom Nordwestrand Tibets in das westchinesische Tarim-Becken hinein (Süden ist oben). Sein genauer Ort ist in der Satellitenaufnahme links unten gezeigt (Rahmen). Ein reißender Fluss, der sich von den öden Hängen zwischen Kunlun- und Altun-Gebirge herabwälzt, hat im Laufe der Jahrmillionen Unmengen an Gesteinsmassen angeschwemmt und übereinander getürmt. In der Falschfarbenaufnahme des Aster-Radiometers auf dem Nasa-Satelliten Terra erscheint er als blaues Band, das sich auf dem Kegel zu einem filigranen Spitzenmuster aufspaltet, teils wieder vereinigt und neu auffächert, bevor das Wasser in der abflusslosen Taklimatan-Wüste versickert und verdunstet. In silbrig grauen Tönen sind zudem ehemalige Arme des Flussdeltas zu sehen. Die Aufnahme zählt zu einer neuen Sammlung von 55 Satellitenbildern, welche die Nasa unter dem Titel »Earth as Art 2« im Internet veröffentlicht hat (siehe »www.spektrum.de« unter »Inhaltsverzeichnis«).

PLANETOLOGIE

Wasser auf dem Mars?

Die Indizien mehren sich, dass auf der Oberfläche des Roten Planeten auch heute noch stellenweise für kurze Zeit flüssiges Wasser auftritt.

Von Thorsten Dambeck

Früher haben Überschwemmungen die Oberfläche des Mars geformt, daran besteht kaum mehr ein Zweifel unter Planetologen (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/1997, S. 50). Andererseits herrschte bis vor kurzem die allgemeine Überzeugung, dass derzeit kein flüssiges Wasser auf unserem Nachbarplaneten existieren kann. Die eisigen Temperaturen und der geringe Atmosphärendruck sollten dafür sorgen, dass es entweder sofort gefriert oder sich in die dünne Gashülle verflüchtigt. Hochauflösende Fotos und Messdaten der beiden Nasa-Sonden Global Surveyor und Mars Odyssey haben kürzlich jedoch ein Fragezeichen hinter diese pauschale Feststellung gesetzt. Demnach könnte das nasse Element sehr wohl auch heute noch eine Rolle bei geologischen und chemischen Prozessen auf und in dem Marsboden spielen.

Ein starkes Indiz dafür präsentierte der Berliner Geograph Dennis Reiß Ende Oktober auf einem Workshop des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln-Porz. Es besteht in der globalen Verteilung so genannter Hangrinnen, im Englischen als *gullies* bezeichnet. Sie sind erst seit rund drei Jahren bekannt, als die Mars Orbiter Camera (MOC) des Global Surveyor die spektakulären, geologisch jungen Strukturen entdeckte. Vorgängern der US-Sonde waren die nur einige Kilometer langen und wenige zehn Meter breiten Furchen entgangen, weil sie unter der Auflösungsgrenze der damaligen Optiken lagen.

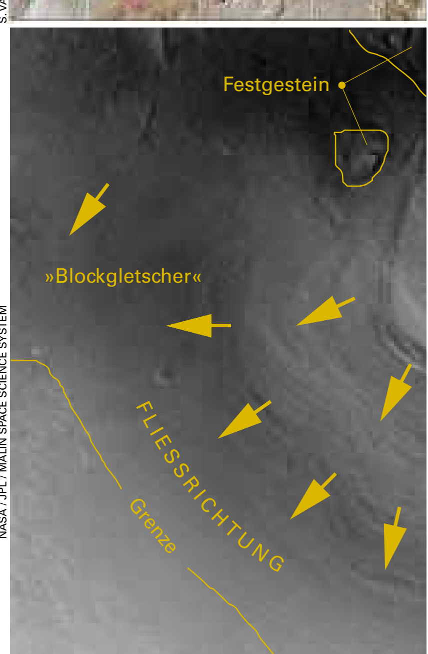
»Wir sehen die Hangrinnen bevorzugt an Kraterrändern, seltener auch an isolierten Berghängen«, erklärt Reiß, der alle bisher veröffentlichten 50000 Global-Surveyor-Fotos danach abgesucht hat und auf rund 1500 Aufnahmen fündig geworden ist. Sehr ähnliche Strukturen gibt es auf der Erde in arktischen oder alpinen Gebieten. Sie entstehen an Hängen, wenn flüssiges Wasser vermischt mit Bodenmaterial ins Rutschen gerät und als Schlammstrom herabfließt.

Interessanterweise kommen die Rinnen nicht überall auf der Marsoberfläche vor: Sie treten nur in zwei Gürteln zwischen 30 und 60 Grad geografischer Breite auf. Auf der heute wärmeren Südhalbkugel sind sie häufiger als im Norden. »Die exzentrische Marsbahn begünstigt den südlichen Sommer, denn der Planet ist zu dieser Jahreszeit der Sonne am nächsten«, erläutert der Berliner Diplomgeograf. Das wirkt sich auf die Temperaturen im Marsboden aus, die sich aus Messungen des Thermal Emission Spectrometer an Bord des Global Surveyor ableiten lassen. Reiß: »Im Norden übersteigen die Tageshöchstwerte nur an sehr wenigen Orten den Gefrierpunkt, im südlichen Sommer werden dagegen auf der Bodenoberfläche Mittagstemperaturen von plus 25 Grad Celsius erreicht.«

Vergleicht man nun die Orte, die heute auf dem Mars die Minimalbedingungen für flüssiges Wasser erfüllen, mit der geografischen Verteilung der Hangrinnen, so zeigt sich eine deutliche Korrelation: »Etwa zwei Drittel liegen in Gebieten – vornehmlich auf der Südhalbkugel – wo sowohl die Druck- als auch die Temperaturverhältnisse flüssiges Wasser zeitweise ermöglichen«, so der Geowissenschaftler auf dem Kölner Workshop.

Bilden sich auch derzeit noch Hangrinnen? Immerhin befinden sich einige auf sehr jungen Terrains, etwa den Dünenfeldern am Russel-Krater (54,5 Süd, 12,7 Ost). Deren dunkler vulkanischer Sand heizt sich in den sommerlichen Mittagsstunden so stark auf, dass unter dem herrschenden Atmosphärendruck flüssiges Wasser existenzfähig ist.

Wie Reiß und Ralf Jaumann vom DLR-Institut für Planetenforschung im Fachmagazin »Geophysical Research Letters« kürzlich erklärten *(Bd. 30, S. 1321)*, könnten jeweils in der warmen Jahreszeit geringe Wassereismengen an den Dünenhängen auftauen und kleine Schlammströme auslösen. »Die morphologischen Veränderungen fallen dann zwar gering aus, sollten nach mehreren Jahren regelmäßiger Auftau-Gefrier-Zyklen aber schließlich sichtbar werden«, schreiben die Autoren. Das würde erklären, warum sich bislang auf den Orbiter-Fotos keine Veränderungen an den Rinnen ausmachen ließen – die Aufnahmen überdecken noch einen zu kurzen Zeitraum.



S. VAN GASSELT, FREIE UNIVERSITÄT BERLIN / NASA

NASA / JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEM

Abgerutschtes Material, das »Restberge« ringförmig umgibt (oben), ähnelt irdischen Blockgletschern. Die Detailaufnahme (unten) lässt die eisstromartige Morphologie deutlich erkennen.

Reifenartige Gletscher

Auch Stephan van Gasselt von der Freien Universität Berlin hat die Bilderflut des Global Surveyor gesichtet und dabei Hinweise sowohl auf flüssiges Wasser als auch auf Eis in fließfähiger Form entdeckt. Sein Interesse galt primär Gebilden, die irdischen Blockgletschern ähneln: Permafroststrukturen, die aus einer Mischung von Felsgestein und Eis bestehen. Auf den Orbiterfotos erscheinen sie als reifenartige Strukturen, die so genannte Restberge an der Talsohle umschließen. Fachsprachlich als Loben bezeichnet, enthalten sie, wie van Gasselt vermutet, ein Geröll-Eis-Gemisch, das



Die Hangrinnen an Kraterrändern des Mars entstanden vermutlich, als Eis im Boden schmolz und zusammen mit Gesteinsmaterial als Schlammstrom den Hang herabfloss.

sich einst den Hang des heutigen Restberges hinabbewegte und an dessen Sohle sammelte. Inzwischen scheint das enthaltene Eis allerdings größtenteils oder ganz sublimiert zu sein.

Außerdem durchforstete der Berliner Forscher das MOC-Fotomaterial nach Strukturen, die Planetologen als Mars-Analoga zu so genannten Eiskeilpolygonen auf der Erde interpretieren – typischen Erscheinungen in heutigen oder ehemaligen Permafrostgebieten. Sie entstehen, wenn sich durch kältebedingte Kontraktion des Bodens Risse bilden, die sich im Untergrund fortpflanzen. In der wärmeren Jahreszeit, wenn die Oberfläche auftaut, füllen sich die Spalten mit Wasser und Bodenmaterial, das später wieder gefriert. Im Laufe der Jahrhunderte wächst so ein unterirdischer Eiskeil, der durchschnittlich einige Meter tief in den Boden reicht. An der Oberfläche verbinden sich die Risse zu den charakteristischen Vieleckmustern. Sie sind in verschiedenen Varianten auch auf der Marsoberfläche verbreitet, was dafür spricht, dass dort zumindest kurzzeitig Wassereis geschmolzen ist.

»Zwischen der globalen Verteilung der Polygone und der Hangrinnen besteht eine auffallende Ähnlichkeit«, resümiert van Gasselt. »Die Blockgletscher treten gleichfalls überwiegend in denselben Breitengradgürteln der Nord- und Südhalbkugel auf, die auch die große Mehrzahl der Rinnen beherbergen.«

Netzstrukturen auf der Marsoberfläche, die Eiskeilpolygonen in irdischen Permafrostgebieten ähneln, lassen darauf schließen, dass gefrorenes Wasser im Boden im Sommer kurzzeitig auftaut.



Dieses räumliche Zusammentreffen sehr unterschiedlicher geologischer Phänomene ist sicherlich kein Zufall. Gemeinsam liefern die geschilderten Befunde somit einen überzeugenden Hinweis darauf, dass auf der Marsoberfläche Wasser sowohl in fester als auch – zumindest kurzzeitig in bestimmten Regionen – in flüssiger Form auftritt.

Schon im Sommer 2002 machte die Sonde Mars Odyssey Schlagzeilen, als sie in polnahen Breiten im obersten Meter Marsboden das spektroskopische Signal von Wasserstoff aufspürte. Dieser muss, da es keine anderen Quellen für das Element im Gestein gibt, von Wassermolekülen stammen. Deshalb wurde der Befund als Beweis für eine Art gefrorenen Ozean im Marsboden gewertet (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 12).

Doch die Sonde registrierte das Wasserstoffsignal auch in gemäßigten und äquatorialen Breiten. Hier muss das Wasser nicht unbedingt als Eis vorliegen. Laut Diedrich Möhlmann vom DLR in Berlin kann es in den oberen Metern auch an Minerale in der als Regolith bezeichneten Gesteinsdecke des Mars gebunden sein. Es bildet dann einen flüssigkeitsartigen Zustand und existiert selbst bei Temperaturen weit unterhalb des Gefrierpunktes im Boden noch als »ungefrorenes Sorptionswasser«.

In dieser Form verdunstet es, so der Physiker, sehr viel langsamer, als Eis sublimiert. Während Letzteres also innerhalb geologischer Zeiträume aus dem oberen Marsboden entweicht, würde das an die Mineraloberfläche gebundene Sorptionswasser zurückbleiben und die chemisch-physikalischen Eigenschaften des heutigen Regoliths maßgeblich beeinflussen. So legen Experimente am DLR-Standort Köln nahe, dass es an fotochemischen Prozessen beteiligt ist, welche die oxidierenden Eigenschaften des Marsbodens erklären könnten.

Aufklärung vor Ort

Möglicherweise wird es nicht lange dauern, bis Klarheit über die Existenz von flüssigem Wasser auf dem Roten Planeten herrscht. Als dieser Artikel in Druck ging, waren vier Raumsonden aus Europa, Japan und den USA auf dem Weg zum Mars (Spektrum der Wissenschaft 12/2003, S. 70). Bei Erscheinen des Heftes sollte die japanische »Nozomi« bereits in eine Umlaufbahn eingeschwenkt sein und der europäische Mars Express gerade ankommen. Letzterer wird eine ortsfeste Landeeinheit absetzen, die bis zu 1,5 Meter tiefe Bohrungen vornehmen kann. Im Laufe des Januar sollen, wenn alles nach Plan verläuft, zwei amerikanische Landefahrzeuge weich auf der Marsoberfläche niedergehen, die als mobile Roboter in der Lage sind, im Umkreis von mehreren hundert Metern zu navigieren und das Gestein zu untersuchen. Zu den Hauptzielen all dieser Missionen gehört die Suche nach Wasser und Lebensspuren. Die Chancen stehen nicht schlecht, dass sie fündig werden.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

VERHALTENSFORSCHUNG

Auch Affen können beleidigt sein

Kapuzineräffchen haben offenbar einen ausgeprägten Sinn für Gerechtigkeit. Im Experiment reagierten sie auf unfaire Tauschangebote ähnlich empört wie Kleinkinder.

Von Frank Schubert

Ein Hauch von Basar-Atmosphäre herrschte im Primaten-Forschungszentrum der Emory-Universität in Atlanta (Georgia). Die Verhaltensforscher Sarah Brosnan und Frans de Waal trieben mit Kapuzineräffchen Tauschhandel. Sie ließen sich von ihnen kleine Steine geben und überreichten ihnen im Gegenzug einen Gemüse-Snack, über den sich die Tiere unverzüglich hermachten. Stein gegen Futter – ein überschaubares Tauschgeschäft, das den Äffchen offenkundig gefiel. Aber nur so lange, wie es gerecht zuging: Bekam ein Tier eine schlechtere »Belohnung« ausgehändigt als sein Nachbar, dann verweigerte es den Deal.

Für das Experiment hatten die Forscher eine einfache, aber sinnreiche Versuchsanordnung entwickelt. Ein Käfig war in zwei, nur durch ein Gitter getrennte Hälften geteilt, in denen jeweils ein Kapuzineraffe saß. Die beiden Tiere konnten sich also gegenseitig beobachten. Ein Experimentator stellte sich vor den Käfig und gab jedem ein Steinchen. Dieses konnten die Äffchen anschließend gegen eine Gurkenscheibe eintauschen.

Ungleiche Belohnung

Doch dann wurden die Forscher gemein: Eines der Tiere bekam für seinen Stein plötzlich eine leckere Weintraube ausgehändigt, während das andere mit der üblichen Gurkenscheibe abgespeist wurde. Da Sichtkontakt bestand, waren beide über die ungleiche Belohnung voll im Bilde. Verständlich, dass das Äffchen mit der Gurkenscheibe sauer reagierte – schließlich hatte sein »Zimmergenosse« für die gleiche Mühe einen weitaus lukrativeren Preis erhascht. Doch bei dem Ärger blieb es nicht. Das »übervorteilte« Tier zog auch eine sehr menschlich anmutende Konsequenz: In fast der Hälfte der Fälle verweigerte es das Tauschgeschäft.

Noch massiver war der Boykott, wenn eines der Äffchen eine Weintraube bekam, ohne dafür einen Stein abgeliefert zu haben, während dem anderen wiederum nur die minderwertige Gurke geboten wurde – nach Abgabe des Steins, wohlgemerkt. In diesem Fall verweigerten achtzig Prozent der benachteiligten Tiere den Tausch. Bei einer weiteren Versuchsvariante setzten die US-Forscher nur in die eine Käfighälfte ein Äffchen und legten in die leere andere eine Weintraube. Mit der unerreichbaren süßen Frucht vor Augen hielt es die Hälfte der Tiere für unter ihrer Würde, das Steinchen für eine Gurke herzugeben *(Nature, Bd. 425, S. 297)*.

Wie der Ethologe Ernst Fehr von der Universität Zürich kommentiert, handelt es sich in all diesen Fällen um eine »emotionale Ur-Reaktion ähnlich wie bei Kleinkindern«. Vom rationalen Standpunkt aus betrachtet, ist diese Verweigerung völlig unverständlich. Keines der

KOMMENTAR

Fairness im Gemeinwesen

Das Leben in Sozialverbänden begünstigt offenbar die Evolution eines starken Gerechtigkeits-Empfindens. Dies belegen die im nebenstehenden Artikel beschriebenen Studien an Kapuzineräffchen ebenso wie psychologische Experimente am Menschen (Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 16). Wir achten sehr darauf, fair behandelt zu werden, und sind dann auch bereit, uns selbst fair zu verhalten. Das gilt für den privaten wie den öffentlichen Bereich.

Doch mit dem fairen Verhalten dem Gemeinwesen gegenüber ist es derzeit schlecht bestellt. Experten schätzen, dass rund zehn Millionen Deutsche regelmäßig schwarzarbeiten; Unehrlichkeiten bei der Steuererklärung sind gang und gäbe. Die Bereitschaft, den Staat zu betrügen, steigt offenbar in dem Maße, wie er statt als fairer Partner als gesichtslose Allmacht erscheint, die heute dieses, morgen jenes von den Bürgern fordert. Wenn zudem das ungute Gefühl entsteht, dass andere, die gerissener sind als man selbst, sich ungerechtfertigt Vorteile verschaffen können, dann kann die öffentliche Hand kaum mehr auf die Fairness des Einzelnen zählen.

Dabei belegen die wissenschaftlichen Untersuchungen zugleich, dass jeder von uns notfalls auch einmal eine Kröte zu schlucken bereit ist. Er muss nur das Gefühl haben, dass sein Opfer der Allgemeinheit zugute kommt und dass die Last gerecht auf alle verteilt wird. Hier liegt ein Potenzial, das der Staat für sich nutzbar machen könnte. Sollte er nicht in viel stärkerem Maße als bisher versuchen, die kooperativen Instinkte des Bürgers anzusprechen – ein Aspekt, dem in der gegenwärtigen Praxis viel zu wenig Beachtung geschenkt wird?

Ein erster Schritt in diese Richtung könnte zum Beispiel eine Kommission für Bürgerfairness sein, gebildet aus Experten mit psychologischem Hintergrund, die bei der Konzeption von Gesetzesvorlagen beratend mitwirkt. Doch darf es nicht bei wohlklingenden Lippenbekenntnissen und Imagekampagnen bleiben. Verlässlichkeit und Berechenbarkeit von Seiten des Staates und ein Dialog mit dem Bürger anstelle eines obrigkeitlichen Verordnungsdenkens müssen oberste Maxime sein.

Gerhard Mühlbauer

Der Autor ist promovierter Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

benachteiligten Tiere zog daraus einen unmittelbaren Nutzen. Weder konnte es etwas an der ungerechten Belohnung ändern noch seinem – vom Experimentator bevorzugten – Nachbarn eins auswischen: Der verputzte in Ruhe seine Weintraube und scherte sich nicht darum, ob nebenan Gurke gegessen oder aus Protest gehungert wurde.

Offensichtlich fügten sich die zu kurz gekommenen Tiere durch ihre Verweigerungshaltung nur selbst zusätzlichen Schaden zu. Wenn dieses Verhalten angeboren ist, worauf manches hindeutet, dann erhebt sich die Frage: Wie konnte es sich in der Evolution durchsetzen, in der doch nur das Erfolg hat, was dem eigenen Vorteil und der eigenen Fitness dient?

Diese Frage rührt an eines der Kernprobleme der Verhaltensforschung. Besonders beim Menschen sind instinktive Verhaltensweisen anzutreffen, die offenkundig nicht unmittelbar dem Eigennutz dienen. So legen die meisten Menschen überall auf der Welt großen Wert auf Fairness – auch wenn sie dafür Nachteile in Kauf nehmen müssen (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52, und 7/2003, S. 10).

Ein Beispiel: Person A bekommt hundert Euro, die sie mit einem unbekannten Partner B teilen muss. Wie viel sie ihm abgibt, darf sie selbst entscheiden. Allerdings muss B zustimmen, sonst gehen beide leer aus. Nur ein einziges Angebot darf unterbreitet werden, Verhandeln ist nicht erlaubt. Dieser Versuch wurde mit vielen Personen aus verschiedenen Kulturkreisen durchgeführt. Zwar zeigten sich kulturell bedingte Unterschiede, aber eines war immer gleich: Wenn das Angebot zu niedrig ausfiel, also zum Beispiel nur bei zwanzig Euro lag, dann wurde das Geschäft als ungerecht empfunden und oft abgelehnt.

Stolze Ablehnung von Almosen

Das ist ebenso merkwürdig wie die Verweigerungshaltung der benachteiligten Affen. Der Geschäftspartner hätte doch in jedem Fall Geld bekommen und keinesfalls Verluste erlitten, egal wie niedrig das Angebot ausfiel. Wäre er auf maximalen Eigennutz aus, müsste er also grundsätzlich zustimmen.

Offenkundig zählt jedoch nicht immer nur der eigene Gewinn; notfalls verzichten Menschen darauf, wenn sie dadurch das als ungerecht empfundene Verhalten anderer bestrafen können. Heute wissen Ethologen, dass das sinnvoll ist: Stimme ich schlechten Geschäften zu, dann erwerbe ich mir den Ruf, billig abgespeist werden zu können. Das verlockt andere dazu, mich auch künftig übers Ohr zu hauen. Werde ich jedoch sauer, sobald man mich übervorteilen will, dann erziehe ich meine Mitmenschen dazu, mir stets einen gerechten Anteil zukommen zu lassen. Die Kosten des kurzfristigen Verzichts zahlen sich langfristig also sehr wohl aus. Unter diesem Aspekt scheint es plausibel, dass die natürliche Auslese negative emotionale Reaktionen auf unfaire Angebote trotz kurzfristiger Nachteile begünstigt.

Damit wird auch das Verhalten der Kapuzineraffen verständlich. Man muss nur den Experimentator in die Überlegungen einbeziehen. Er ist für die Tiere der »Kooperationspartner«; denn er entscheidet über die Belohnung beim Tauschgeschäft. In freier Wildbahn träte ein anderes Kapuzineräffchen an seine Stelle. Und dann macht die Verweigerung Sinn: Das Äffchen kündigt die wenig lukrative Geschäftsbeziehung zu einem miesen Partner, der versucht, es zu übervorteilen.

Merkwürdig ist allerdings, dass das Experiment nur mit Weibchen ein eindeutiges Ergebnis lieferte. Die Männchen reagierten weniger emotional. Die Forscher erklären sich den Unterschied damit, dass die männlichen Tiere einfach nicht so sehr darauf achten, was im Nachbarkäfig geschieht. Auch da könnte man eine Parallele zum Menschen sehen. Angeblich soll ja der Neid auf Konkurrentinnen bei Frauen ausgeprägter sein.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das junge Äffchen erwartet von dem älteren Tier einen fairen Anteil an dem Leckerbissen.

Frank Schubert ist promovierter Biophysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

ALZHEIMER

Impfen gegen das Vergessen

Während die Immunisierung gegen die Alzheimer-Krankheit bei Mäusen gelang, zeigte eine Studie am Menschen zunächst keine positiven Resultate und musste wegen schwerer Nebenwirkungen sogar abgebrochen werden. Doch eine Züricher Gruppe war nun erfolgreich.

Von Felix Straumann

Trotz intensiver Forschungen in den letzten zwei Jahrzehnten ist die Alzheimer-Krankheit noch immer eines der großen Rätsel der modernen Medizin. Zwar finden Wissenschaftler zunehmend Puzzleteile, die zusammenpassen, doch ein Gesamtbild zeichnet sich erst schemenhaft ab. Auch wenn aktuelle Therapiemethoden den Krankheitsverlauf verzögern und Auswirkungen auf die Psyche der Patienten mindern, können sie das Fortschreiten bis zum Schwachsinn nicht verhindern. Deshalb arbeiten Mediziner fieberhaft an neuartigen Behandlungsstrategien. Als besonders Erfolg versprechend gilt die Impfung. Nach einem schweren Rückschlag im letzten Jahr hat sie durch die Studie einer Züricher Forschungsgruppe nun wieder Aufwind bekommen *(Neuron, Bd. 38, S. 547)*.

Die Alzheimer-Krankheit beginnt mit leichter Vergesslichkeit, führt im weiteren Verlauf zur fortschreitenden Einbuße intellektueller Fähigkeiten und endet mit schwerer Demenz. Die Patienten durchleben in gewisser Weise die umgekehrte Entwicklung vom Kleinkind zum Erwachsenen. Ursache sind organische Veränderungen, die der deutsche Neurologe Alois Alzheimer schon 1906 zum ersten Mal beschrieb, nachdem er das Gehirn einer verstorbenen Patientin genauer untersucht hatte.

Verheerende Abbauprozesse im Gehirn

Anatomisch am auffälligsten ist der Verlust von bis zu einem Viertel der Hirnsubstanz. Damit einher geht die Bildung von Fasern in den Nervenzellen. Diese so genannten Neurofibrillen bestehen aus Tau-Protein, einem normalen Bestandteil der Zellskeletts. Bei der Alzheimer-Krankheit ist es allerdings verändert und stört Transport- und Stabilisierungsprozesse in den Zellen, sodass sie absterben. Außer diesen intrazellulären Neurofibrillen bilden sich auch Ablagerungen zwischen den Neuronen. Diese »Plaques« bestehen aus dem Protein β-Amyloid sowie krankhaft veränderten Nervenzellfortsätzen und Stützzellen.

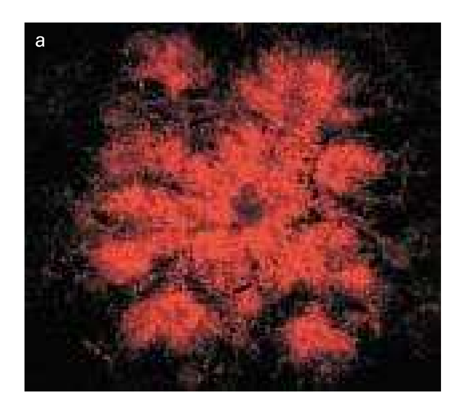
Welche dieser pathologischen Veränderungen letztlich die Krankheit auslösen, ist noch umstritten. Die meisten Forscher favorisieren die Hypothese, dass fehlerhafte Prozesse rund um das β-Amyloid die entscheidende Ursache sind. Es bildet sich aus Amyloid-β-Peptiden, die bei der enzymatischen Spaltung eines Amyloid-Vorläuferproteins (*amyloid precursor protein*, APP) entstehen.

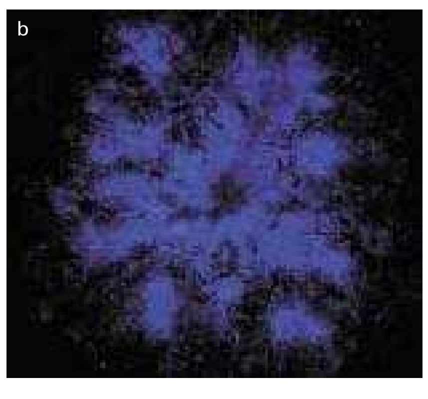
Die normale Funktion dieser Moleküle ist noch nicht genau bekannt. Wenn in der Abbaukaskade etwas schief läuft, reichern sich die Amyloid-β-Peptide an und verklumpen mit der Zeit zu den Plaques, welche die Arbeit der Nervenzellen beeinträchtigen. Zugleich bewirken sie die Bildung der intrazellulären Fasern aus Tau-Protein, an denen die Neuronen letztlich zu Grunde gehen.

Die Plaques bieten sich daher als Ziel für eine Impfung an. Eine Schwierigkeit dabei ist allerdings, dass Amyloid-β-Peptide auch im gesunden Menschen vorkommen und nur in verklumpter Form, als β-Amyloid, krankhaft sind. Bei einer Impfung ist es deshalb wichtig, dass Antikörper nur gegen diese pathologische Form gebildet werden, da es sonst zu einer Autoimmunreaktion kommt, bei der sich der Körper selbst bekämpft.

Die Forschungsgruppe um Christoph Hock und Roger Nitsch von der Universität Zürich hat Alzheimer-Patienten mit synthetischem β-Amyloid geimpft. Zwanzig der dreißig Versuchsteilnehmer entwickelten daraufhin dauerhaft Antikörper gegen β-Amyloid-Plaques. Psychologische Tests zeigten, dass bei ihnen die geistigen Fähigkeiten während eines Jahres langsamer abnahmen als bei den anderen Patienten. Auch zeigte sich eine Dosis-Wirkungsabhängigkeit: Versuchsteilnehmer mit vielen Antikörpern waren besser in den psychologischen Tests als solche mit wenigen.

Zwei Patienten bildeten zwar Antikörper gegen den Impfstoff, aber nicht gegen die Plaques. Bei ihnen zeigten sich keine positiven Effekte auf den Krankheitsverlauf. Offenbar erkannten die Antikörper Teile des synthetischen Amylo-





Mit einem neuartigen Test konnten Züricher Forscher die Wirksamkeit der Alzheimer-Impfung beim Menschen nachweisen. Sie gaben zu Hirngewebeschnitten von Alzheimer-Mäusen Gehirn-Rückenmark-Flüssigkeit von mit β-Amyloid geimpften Patienten. Menschliche Antikörper in der Flüssigkeit, die sich an den Hirnschnitt banden, wurden mit einer roten Fluoreszenzfärbung sichtbar gemacht (a). Ein sehr ähnliches Bindungsmuster entstand, wenn der Hirnschnitt mit monoklonalen Antikörpern gegen β-Amyloid versetzt und blau eingefärbt wurde (b). Die Überlagerung der beiden Bilder, in der sich rot und blau zu violett mischen, macht die weitgehende Übereinstimmung deutlich (c). Demnach richten sich die Antikörper des geimpften Patienten tatsächlich gegen die β-Amyloid-Plaques.

id-Impfstoffs, die in den Plaques nicht zugänglich waren. Die Zürcher Forscher werten ihre Studie als ersten überzeugenden klinischen Beweis für die zentrale Rolle von β-Amyloid beim geistigen Verfall von Alzheimer-Patienten.

Ihre Untersuchung war ursprünglich Teil einer internationalen Multicenter-Studie der beiden Firmen Elan und Wyeth-Ayerst. An einer amerikanischen und fünf europäischen Kliniken erhielten insgesamt 375 Alzheimerpatienten regelmäßige Impfungen mit synthetischem β-Amyloid. Das Projekt wurde jedoch im Frühjahr 2002 abgebrochen, weil sechs Prozent der Versuchsteilnehmer an schwerer Hirnhautentzündung erkrankten. Wie alle anderen beteiligten Teams stoppten auch die Züricher Forscher die Impfungen. Allerdings beobachteten sie die Patienten weiter.

Der erzwungene Abbruch der Multicenter-Studie war eine herbe Enttäuschung; denn die davor durchgeführten Experimente hatten große Hoffnungen geweckt. Mitte der neunziger Jahre verdichteten sich die Hinweise auf die entscheidende Bedeutung von β-Amyloid bei der Alzheimer-Erkrankung. Unter anderem gelang es Forschern der Firma Elan, genetisch veränderte Alzheimer-Mäuse herzustellen, die Amyloid-Plaques im Gehirn entwickelten und deren kognitive Leistungsfähigkeit daraufhin abnahm. Einige Jahre später glückte dann auch die Impfung dieser Alzheimer-Mäuse (Spektrum der Wissenschaft 11/99, S. 14). Neuablagerungen von β-Amyloid wurden dadurch gestoppt und sogar bestehende Plaques abgebaut. Die anschließenden Verträglichkeitstests an hundert Alzheimer-Patienten mit dem Ziel, die Dosierung und Sicherheit der Impfung abzuklären, verliefen ebenfalls positiv.

Erfolg durch genaueren Test

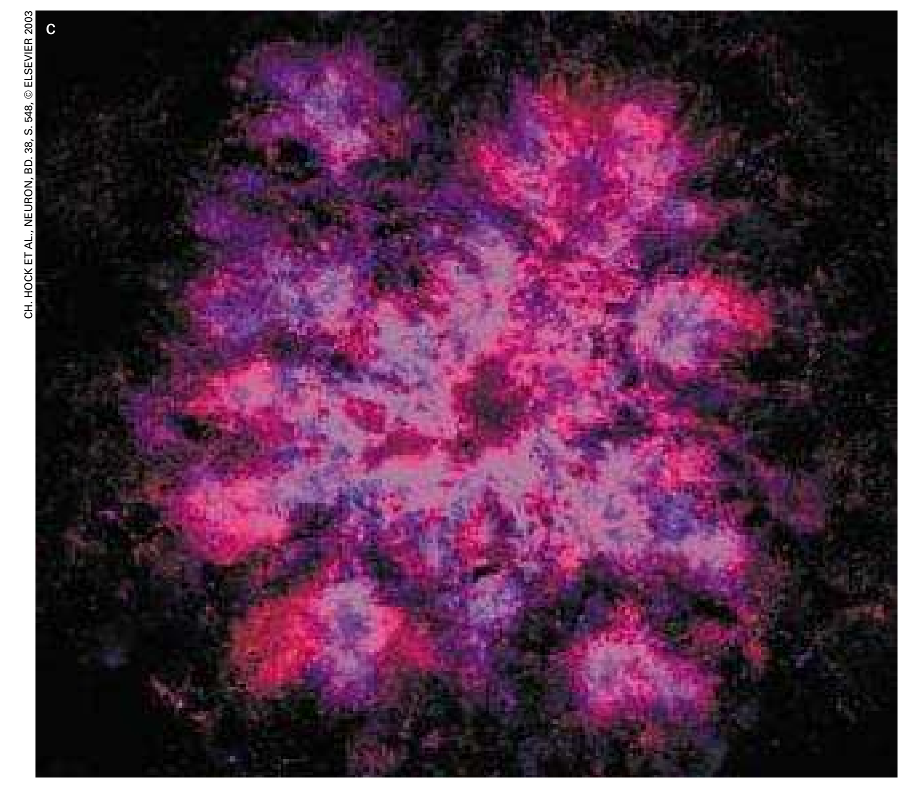
Über die Ursache der Hirnhautentzündungen wird noch spekuliert. Jedenfalls steckte keine Infektion dahinter. Wahrscheinlich handelte es sich um eine übermäßige zelluläre Immunreaktion als Folge der Therapie. In der Züricher Studie beeinflusste sie die Impfwirkung allerdings nicht. Bei den drei betroffenen Patienten klang die Entzündung unter einer üblichen Kortisonbehandlung ab. Zwei von ihnen bildeten Antikörper gegen β-Amyloid und schnitten in den kognitiven Tests gleich gut ab wie Teilnehmer ohne die Entzündung.

Viele Wissenschaftler begrüßen die Veröffentlichung der Gruppe um Hock, warnen aber vor übereilten Schlussfolgerungen, da nur relativ wenige Patienten untersucht wurden. Entscheidend für die positiven Resultate der Zürcher Forscher war offenbar, dass sie einen speziellen Test entwickelt hatten, bei dem nicht nur das Vorhandensein von Antikörpern, sondern auch auch ihre Fähigkeit zur Bindung an Amyloid-Plaques auf Hirngewebeschnitten von Alzheimer-Mäusen gemessen wird. Erst dieser so genannte Tapir-Assay *(tissue amyloid plaque immunoreactivity assay)* offenbarte einen Zusammenhang zwischen Antikörpern und klinischen Symptomen. Mit dem ursprünglichen Test der Firmen Elan und Wyeth-Ayerst war dies nicht gelungen. Deshalb wird der Tapir-Assay nun nachträglich bei allen Teilnehmern der Multicenter-Studie durchgeführt.

Das Ergebnis sollte erweisen, wie allgemein gültig die Resultate der Zürcher Untersuchung sind. Doch wie immer es ausfällt, bleibt die Impfung gegen das Vergessen für viele Forscher eine viel versprechende Strategie. Einige ziehen allerdings die passive Variante vor. Dabei wird der Körper nicht – wie in der Zürcher Studie – zur Bildung von Antikörpern gegen den Impfstoff angeregt; vielmehr injiziert man gleich die fertigen Antikörper. Dies hat den Vorteil, dass keine unerwünschten Immunreaktionen auftreten, die Nebenwirkungen wie eine Hirnhautentzündung bewirken könnten.

Allerdings müssen die Antikörper erst noch entwickelt und dann gentechnisch produziert werden. Der Umstand, dass der Körper sie nicht selbst herstellt, zwingt außerdem dazu, die Injektion regelmäßig zu wiederholen. Eine andere Strategie ist die aktive Impfung mit nur einem Teil des Amyloid-Peptids. Dies kann ebenfalls verhindern, dass Immunzellen auf den Plan treten, die unerwünschte Nebenwirkungen auslösen.

Ob und wann die Immunisierung gegen Alzheimer gelingt und praktiziert wird, bleibt offen. Noch gibt es zu viele unbeantwortete Fragen zum Mechanismus der Erkrankung, aber auch ethische Erwägungen spielen eine Rolle. So weist der renommierte Alzheimer-Forscher Steven Paul vom Lilly-Forschungslabor in Indianapolis darauf hin, dass bei Krebstherapien Risiken von weit über fünf Prozent akzeptiert werden. Da die Alzheimer-Demenz eine ähnlich schlechte Prognose hat wie viele Tumoren, wäre seiner Ansicht nach zu überlegen, ob man auch die Hirnhautentzündungen toleriert, wenn sich die Impfung mit β-Amyloid als erfolgreich herausstellen sollte.



Felix Straumann ist Biologe und freier Wissenschaftsjournalist in Zürich.

QUANTENPHYSIK

Herantasten an das unvermeidliche Zittern

Mit einem raffinierten hochempfindlichen Bewegungssensor schafften es amerikanische Forscher fast, die fundamentale Ortsunschärfe eines mikroskopisch kleinen Objekts nachzuweisen. Bis zum endgültigen Erfolg scheint es nur noch ein kleiner Schritt.

Von Stefan Maier

Dass sich Ort und Geschwindigkeit eines Körpers nicht gleichzeitig beliebig genau ermitteln lassen, gehört heute schon fast zum Allgemeinwissen. Je besser man versucht, den Ort eines Objekts zu bestimmen, desto mehr »verschwimmt« seine Geschwindigkeit und umgekehrt. Selbst die leistungsfähigsten Geräte helfen nichts – das berühmte, von Werner Heisenberg im Jahre 1927 aufgestellte Unbestimmtheitsprinzip (auch als Unschärferelation bekannt) macht alle Liebesmüh zu Schanden. Daher fasziniert es von jeher Intellekt und Fantasie von Forschern und Laien zugleich.

Dieser Faszination sind auch Robert Knobel und Andrew Cleland von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara erlegen. Ihnen genügt es nicht, das Unbestimmtheitsprinzip als Grundpfeiler der Quantenmechanik zu akzeptieren, sie möchten es auch gewissermaßen mit Händen greifen. Deshalb haben sie versucht, es an mikroskopisch »großen« Kristallen direkt nachzuweisen. Über das Ergebnis berichteten sie kürzlich in der Zeitschrift »Nature« *(Bd. 424, S. 291)*.

Das Unterfangen der kalifornischen Forscher ist kühn, da die Unschärfen von Ort und Geschwindigkeit umso geringer werden, je mehr Masse der fragliche Körper auf die Waage bringt. Heisenbergs Ungleichung konnte deshalb bis jetzt nur indirekt durch Untersuchungen von Atomen und noch kleineren Teilchen überprüft werden, nicht aber direkt an Körpern, die aus vielen Millionen Atomen bestehen.

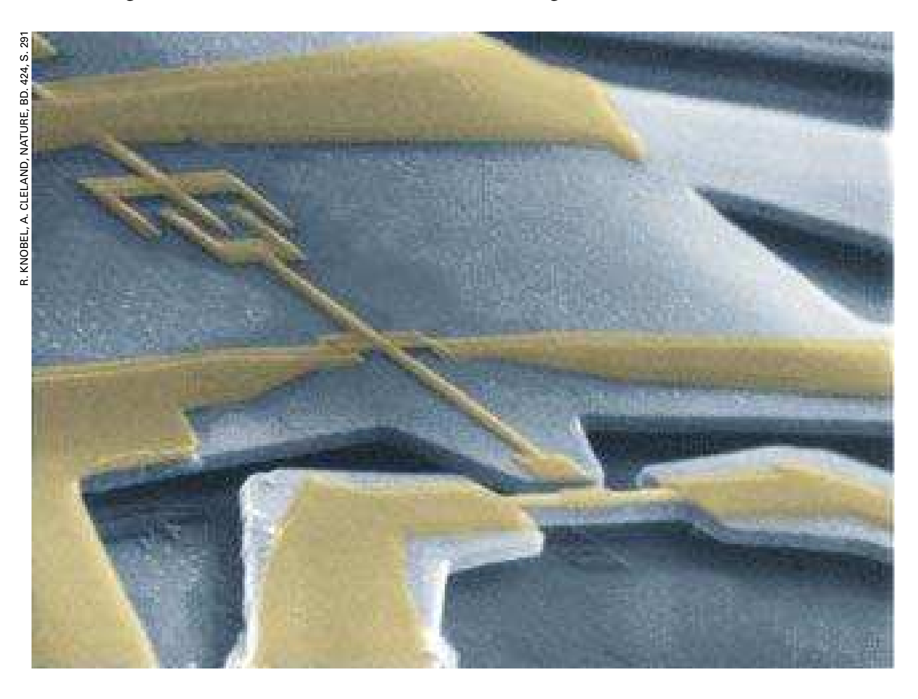
Welches Objekt wäre für einen solchen Test geeignet? Wie Miles Blencowe vom Dartmouth College in Hanover (New Hampshire) in einem begleitenden Kommentar zur Nature-Veröffentlichung (S. 262) darlegt, ist eine Analogie hilfreich. Man nehme ein Lineal und spanne es auf einer Seite in einen Schraubstock. Wird dann das freie Ende angestoßen, schwingt es eine Weile hin und her, bevor es langsam wieder zur Ruhe kommt. Aber selbst wenn es schließlich völlig still zu stehen scheint, vibriert es in Wahrheit immer noch.

Unter Umgebungsbedingungen hat dieses leichte Zittern vor allem zwei Ursachen: Zum einen stoßen von oben und unten unablässig Luftmoleküle gegen das Lineal, zum anderen führen dessen Atome thermische Bewegungen aus. Diese wärmebedingten Schwingungen sind viel größer als die durch die Unschärferelation ausgelösten Orts- und Geschwindigkeitsschwankungen: die so genannten Nullpunktsschwingungen.

Um Letztere mit einem Sensor aufspüren zu können, muss daher zunächst einmal ein Vakuum erzeugt sowie die Temperatur stark gesenkt werden – fast bis zum absoluten Nullpunkt, der bei –273,15 Grad Celsius oder 0 Kelvin liegt. Dort endlich sollten die von Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip geforderten Schwingungen dominieren und sich experimentell nachweisen lassen, falls der Sensor empfindlich genug ist.

Balken und Sensor in einem Chip

Selbstverständlich benutzten die Forscher für ihr Experiment kein Lineal, sondern ein viel kleineres Äquivalent: einen nur wenige Mikrometer langen Balken aus einkristallinem Galliumarsenid, der auf Grund seiner mechanischen Eigenschaften wesentlich schneller vibrierte – mit einer Frequenz von etwa 100 Megahertz (Bild). Seine beiden Enden waren an Metallkontakten befestigt.



R. KNOBEL, A. CLELAND, NATURE, BD. 424, S. 291

◀ Das Gerät zur Messung der Nullpunktsschwingung eines Balkens – hier eine eingefärbte rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, in der Metall golden und Halbleitermaterial graublau erscheint – ist nur wenige Mikrometer groß und wurde mit lithografischen Verfahren in einen Galliumarsenid-Kristall eingeätzt. Ein Ein-Elektron-Transistor auf einer Metallinsel reagiert mit Stromstärkeänderungen auf Bewegungen von Ladungsträgern, die der schwingende Balken verursacht.

Zudem trug er einen Überzug aus Aluminium. In Gegenwart eines starken Magnetfelds ließ er sich deshalb durch einen elektrischen Wechselstrom, der so genannte Lorenz-Kräfte erzeugte, in Schwingungen versetzen. Da deren Amplitude in berechenbarer Weise von der Stärke des Stroms abhing, konnten die Forscher ihren hochempfindlichen Bewegungssensor auf einfache Weise kalibrieren.

Dieser Sensor bestand aus einem so genannten Ein-Elektron-Transistor: einer winzigen Metallinsel, die durch extrem schmale Spalte von zwei elektrischen Kontakten getrennt war. Normalerweise fließt kein Strom. Beim Anlegen einer Spannung können jedoch einzelne Elektronen von einem Kontakt zum anderen »tunneln«, indem sie die Insel als Zwischenstation benutzen.

Das Besondere am Ein-Elektron-Transistor ist, dass die Stärke des Tunnelstroms sehr empfindlich von Ladungen in unmittelbarer Nähe der Metallinsel abhängt. Die Forscher brachten ihren Transistor deshalb im Abstand von nur ▷

NACHGEHAKT

Hormesis: Tut Gift in kleinen Dosen gut?

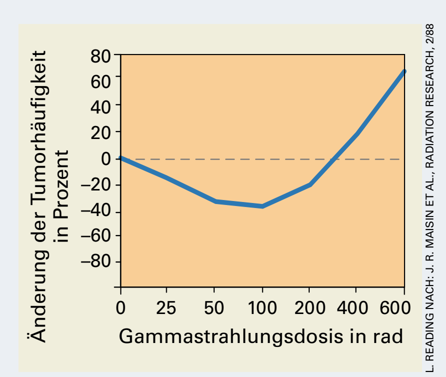
»Die Dosis macht das Gift«, dekretierte Paracelsus schon im 16. Jahrhundert. Auch die Homöopathie beruft sich seit 150 Jahren auf das Dogma, dass eine giftige Substanz, in sehr kleinen Dosen verabreicht, heilsam sein kann. Auf das Gebiet der Umweltforschung übertragen lautet die analoge Botschaft: Kleine Umweltbelastungen sind gesund.

Diese paradox anmutende These fristete unter dem Fachnamen »Hormesis« – griechisch etwa: Anregung, Anstoß – eher ein Schattendasein am Rande seriöser Forschung; nur vereinzelt wurde sie im vorigen Jahrhundert in der Auseinandersetzung um die Reststrahlenbelastung durch nukleare Bombentests und den Betrieb von Kernkraftwerken ins Treffen geführt.

Vor allem in den 1960er Jahren gab es Streit um die Existenz eines Schwellenwerts, unterhalb dessen Radioaktivität unschädlich oder gar zuträglich sei. Befürworter der Kernenergie waren für den Schwellenwert; der »Vater der Wasserstoffbombe« Edward Teller propagierte damals den Bau eines zweiten Panama-Kanals mittels einer Serie von Nuklearexplosionen und hielt die radioaktive Umweltbelastung für vernachlässigbar. Erst allmählich setzte sich die – heute vorherrschende – Praxis durch, zwischen Dosis und biologischer Schädigung eine lineare Relation anzusetzen. Demzufolge wirken auch beliebig kleine Dosen in geringem Maße schädlich.

In neuem Gewand scheinen Hormesis und Schwellenwertdebatte jetzt wieder aufzuerstehen: In »Nature« erschien am 13. Februar 2003 das Plädoyer eines extremen Hormesis-Befürworters, »Scientific American« brachte im September einen Bericht, und »Science« zog am 17. Oktober eher kritisch nach. Diesmal steht allerdings nicht Radioaktivität im Vordergrund, sondern das Risiko durch Chemikalien.

In dem Artikel in »Nature« fordert Edward Calabrese von der Universität von Massachusetts in Amherst mit starken Worten einen Paradigmenwechsel der Toxikologie und einen radikalen Wandel des öffentlichen Risikobewusstseins. Das gängige lineare Dosis-Schaden-Modell sei grundfalsch: Vor Erreichen der Nulldosis sinke die tatsächliche Kurve oft sogar U-förmig unter das Schadensniveau bei Abwesenheit des Schadstoffs – kleine Dosen schadeten demnach nicht, sondern nützten sogar (Bild).



Werden Mäuse schwachen Gammastrahlen ausgesetzt, so entwickeln sie weniger bösartige Tumore als unbestrahlte Nager. Erst oberhalb 200 rad wirkt die Bestrahlung immer schädlicher.

Calabrese sammelte mit Koautorin Linda Baldwin in der Fachliteratur Tausende von Beispielen für paradoxe Wirkungen geringer Substanz- oder Strahlungsmengen. So zeigen Versuche an Nagern, dass bei geringen Strahlen- oder Dioxinbelastungen anscheinend weniger Geschwülste auftreten als ohne jegliche Belastung. Aus derlei Daten folgert Calabrese, die Hormesis sei allgegenwärtig. Er erklärt sie mit einer überkompensierenden Abwehrreaktion des Organismus, einer Art Trainings- oder Abhärtungseffekt. Darum sei es grundfalsch, die Öffentlichkeit mit der Schädlichkeit winziger Substanzmengen zu ängstigen und viel zu niedrige Grenzwerte festzusetzen.

Eher skeptisch sind die Reaktionen der Fachkollegen. Dass radioaktiv bestrahlte oder chemisch belastete Pflanzen manchmal spektakulär gedeihen, verdeckt oft schädliche Neben- und Nachwirkungen der Belastung. Vermutlich ist die Hormesis letztlich meist kontraproduktiv: Für die zunächst erfolgreiche Abwehr-Überreaktion zahlt der Organismus einen Preis, durch den er – wenn auch verzögert – erst recht Schaden nimmt.

Der Zeitpunkt der neuen Schwellenwertdebatte scheint nicht ganz zufällig. In den USA sträubt sich die Regierung, niedrigere Grenzwerte für Arsen im Trinkwasser festzusetzen oder die Kohlendioxid-Grenzwerte des Kyoto-Protokolls zu akzeptieren; in allen Industriestaaten – von den ärmeren Ländern ganz zu schweigen – schaffen wirtschaftliche Probleme günstige Bedingungen für ein ökologisches Rollback.

Dennoch sieht es noch nicht nach dem von Calabrese prognostizierten Paradigmenwechsel aus. Bis zum Beweis des Gegenteils wird es bei der linearen Extrapolation nach kleinen Dosen bleiben, weil man damit auf der sicheren Seite ist. Die Hormesis-Debatte führt aber heilsam vor Augen, wie viel Unwissenheit sich hinter dieser geraden Linie noch immer verbirgt.

Michael Springer

▷ etwa 250 Nanometern von dem Balken an. (Genauer gesagt, erzeugten sie beide Komponenten mit lithografischen Verfahren der Chip-Industrie dicht nebeneinander in ein und demselben Galiumarsenid-Kristall.) Die Schwingungen des elektrisch geladenen Balkens ließen sich dann direkt anhand der Schwankungen des Tunnelstroms verfolgen.

Nun senkten die Forscher die Temperatur ab. Wie erwartet, wurden die thermischen Schwingungen des Balkens dadurch immer kleiner. Bei weniger als einem Kelvin registrierte der Bewegungssensor dann Ausschläge von nurmehr etwa einem Picometer – dem hundertsten Teil eines Atoms! Um zu verstehen, wie extrem wenig das ist, bedenke man, dass der kleine Balken selbst aus etwa zehn Milliarden Atomen bestand.

Nachweis extrem schwacher Kräfte

Doch leider reichte selbst diese fantastische Genauigkeit nicht, die Nullpunktsschwingungen zu sehen. Sie wurden auch bei einigen hundertstel Kelvin noch von thermischen Vibrationen überdeckt. Da es schwierig ist, niedrigere Temperaturen auf einfache Weise zu erreichen, wollen die Forscher in einem nächsten Experiment einen Balken mit einer zehnmal höheren Eigenfrequenz herstellen. Dann sollten die Nullpunktsschwingungen schon bei dreißig Millikelvin größer sein als die thermischen Vibrationen.

Doch das allein genügt noch nicht: Auch die Genauigkeit des Bewegungssensors muss noch um etwa einen Faktor hundert gesteigert werden. Knobel und Cleland halten dies aber mit einem verbesserten Herstellungsverfahren für erreichbar.

»Und was hat man davon?«, mag der eine oder andere Leser fragen, der das alles für bloße Spielerei von Grundlagenforschern hält. Ein theoretisches Konzept – und sei es noch so bewährt – experimentell zu überprüfen, hat für sich allein schon seine Berechtigung. Aber die hochempfindlichen Bewegungssensoren der beiden Amerikaner sind auch für handfeste Zwecke zu gebrauchen. So könnten sie prinzipiell dazu dienen, die Wirkungen extrem schwacher Kräfte zu ermitteln. Nicht nur Hersteller genauer Magnetfeldmikroskope wüssten das sehr zu schätzen.

Stefan Maier ist promovierter Physiker und arbeitet am California Institute of Technology in Pasadena. ◁

KOMMENTAR

Mit dem Holzhammer

Norwegen versucht, Lachse vor Parasiten zu schützen. Doch die Therapie scheint schlimmer als die Krankheit.

Wenn es um Lachs geht, verlieren Norweger leicht ihre nordische Gelassenheit. Denn der Edelfisch gehört zur Identität des skandinavischen Landes wie der Kuckuck in die Schwarzwalduhr. In über 600 Flüssen tummeln sich einige der größten Wildlachspopulationen weltweit – hinzu kommen zahlreiche küstennahe Aufzuchtbetriebe.

Doch seit Jahrzehnten schrumpfen die Bestände. Zu den vielfältigen Ursachen gesellte sich jüngst ein neuer Sündenbock: *Gyrodactylus salaris*, ein parasitischer Saugwurm, der in den 1970er Jahren erstmals nachgewiesen wurde – kurz nachdem eine Lieferung schwedischer Jungfische in Norwegen eingetroffen war. Bis heute hat der Parasit 41 Flüsse und 37 Aufzuchtfarmen infiziert. Die Folge: zerfressene Haut und große entzündete Wunden, die für Jungfische zumeist tödlich sind.

Deshalb hat sich die norwegische Regierung zu drastischen Maßnahmen entschlossen. Das von ihr gegründete Wildlachs-Komitee veranlasste bisher die Vergiftung von 25 Wasserläufen mit dem Mittel Rotenon. Diese natürliche Substanz aus tropischen Leguminosen wird schnell über Kiemen oder Tracheen aufgenommen und hemmt die Atmungsenzyme in den Mitochondrien, den »Kraftwerken« der Zellen. Dem gewollten Giftanschlag fallen so aber nicht nur die infizierten Lachse, sondern auch alle anderen Fische des Flusses zum Opfer. Mit ihnen erstickt ein großer Teil der Wasserinsekten, Krebse, Weichtiere und Würmer.

Wie ist dieser Kahlschlag zu verantworten? Die aquatische Fauna regeneriere sich spätestens nach einem Jahr, indem sie aus benachbarten Gebieten neu einwandere, heißt es von Regierungsseite. Aus den USA, wo Rotenon gelegentlich für die Kontrolle der Artenzusammensetzung in Fischgewässern eingesetzt wird, ist indes anderes bekannt. So fehlte nach der Behandlung des Strawberry River in Utah von 21 Prozent der aquatischen Fauna noch nach fünf Jahren jede Spur.

Ist die chemische Keule überhaupt notwendig? Zahlreiche Beispiele zeigen, dass sich relativ schnell Resistenzen gegenüber neuen Parasiten aufbauen können. So erkrankten die Wildfische Großbritanniens um 1900 massiv an Furunkulose; inzwischen sind die Populationen immun. Die noch rasantere Anpassung australischer Kaninchen an das Myxomatose-Virus mag ein anderes Vorbild sein. Warum lässt man also in Norwegen der Natur nicht ihren Lauf und investiert das Geld in sinnvollere ökologische Maßnahmen?

Offenbar löst das Sinken der Fangzahlen allein schon eine norwegische Identitätskrise aus. Angler fühlen sich in ihrer persönlichen Ehre getroffen, wenn die Fischsaison »katastrophal« verläuft. Tatenlos dem Zerstörungswerk des Parasiten zuzusehen, scheint da unmöglich. Dann lieber radikal ausmerzen und neue Jungfische einsetzen.

Aber auch kommerzielle und politische Interessen dürften den Totschlägern die Hand führen. Die norwegische Lachsindustrie ist die größte der Welt und bildet nach der Ölindustrie die zweitwichtigste Säule des Exports. In den eng besetzten Farmkäfigen der Lachsfarmen breiten sich Krankheiten schnell aus. Viele Betriebe mussten wegen *Gyrodactylus* schließen. Sie haben ein Interesse daran, dass der Parasit verschwindet – und zwar möglichst schnell.

So wandert man in Norwegen weiter auf Pfaden biologischer Unvernunft. Fünfzehn der mit Rotenon behandelten Flüsse wurden bisher für gesund erklärt, aber acht weisen schon wieder eine Neuinfektion mit dem Parasiten auf. Weitere 14 Flüsse sollen in den kommenden Jahren vergiftet werden. Dann spülen sie wieder fast alles, was einst in ihnen lebte, ins Meer.

Antje Kahlheber

Die Autorin ist Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

Kugelsternhaufen in neuem Licht

Die kompakten Ansammlungen aus Abertausenden oder gar Millionen Sternen sind die Greise des Universums – so jedenfalls dachten die Astronomen lange Zeit. Doch viele Kugelsternhaufen sind überraschend jung, wie neuere Forschungen zeigen. Sie entstehen, wenn Galaxien miteinander kollidieren.

Von Stephen E. Zepf und Keith M. Ashman

Die Sterne liegen in den meisten Regionen der Galaxis verstreut wie Farmen in der Prärie: Getrennt durch riesige Entfernungen verbringen sie ihr Dasein, ohne sich jemals zu begegnen. Einige Regionen des Milchstraßensystems ähneln jedoch eher Ballungszentren als dem flachen Land. Das sind die Kugelsternhaufen, in denen Millionen von Sternen in einem Volumen zusammengedrängt sind, in dem sich sonst vielleicht nur einer aufhalten würde.

Diese sphärischen Gebilde sind nicht nur überfüllt, sondern auch überaltert: Die rund 200 Kugelsternhaufen der Milchstraße enthalten einige der ältesten bekannten Sterne des Universums – junge Bewohner sind in ihnen dagegen nicht auszumachen. Entsprechend haben die Astronomen Kugelsternhaufen als historische Stätten angesehen, vergleichbar den alten Stadtvierteln von Rom oder Istanbul, vor langer Zeit erbaut und seither kaum verändert: kompakte, in die Jahre gekommene Metropolen, die uns zwar viel über längst vergangene Zeiten berichten können, aber wenig darüber, was sich in Galaxien heute abspielt.

So dachten die Astronomen zumindest. Doch jüngst mussten die Forscher die Karten der Galaxis neu zeichnen und ihre Lehrbücher umschreiben. Mit dem durchdringenden Blick des Hubble-Weltraumteleskops haben sie das Licht neuer Ballungsgebiete entdeckt – neu gegründeter Städte voller Aktivität. Kugelsternhaufen können offenbar auch heute noch entstehen, wenn Galaxien mitei- ▷



Zusammenstöße zwischen Galaxien gehören zu den wichtigsten Ereignissen in der Geschichte des Universums. Diese künstlerische Darstellung zeigt eine solche Kollision von einem Standort in einem alten Kugelsternhaufen (Vordergrund) im Außenbereich einer der beiden Galaxien. Früher glaubten die Astronomen, alle Kugelsternhaufen seien alt, entstanden in der Frühzeit des Kosmos. Neuere Forschungen zeigen jedoch, dass auch heute noch Kugelsternhaufen entstehen – eben in Folge von Galaxienkollisionen.

RON MILLER



▷ nander kollidieren. Diese Entdeckung lieferte den Forschern den Schlüssel zu neuen Erkenntnissen in wichtigen Bereichen der Astronomie, zum Beispiel der Entstehung und Entwicklung massereicher Galaxien.

Schon seit fast einhundert Jahren wissen die Astronomen, dass Kugelsternhaufen praktisch allgegenwärtig sind: Es gibt sie in fast jeder Galaxie. Mit wenigen Ausnahmen haben alle Sterne in einem solchen Haufen etwa das gleiche Alter und die gleiche chemische Zusammensetzung. Kugelsternhaufen sind also offenbar die Folge eines stellaren Babybooms – der gleichzeitigen Entstehung einer großen Zahl von Sternen in einer kleinen Region. In unserem Milchstraßensystem fand dieser Prozess zeitgleich mit der Entstehung der Galaxis selbst statt. Deshalb sind die Kugelsternhaufen ideale Objekte, um das Alter des Universums zu bestimmen und den galaktischen Entstehungsprozess zu untersuchen (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2001, Seite 26, und 6/2002, Seite 38).

Verschmelze eine Galaxie, erschaffe einen Kugelsternhaufen

Interessanterweise sind die Kugelsternhaufen des Milchstraßensystems über einen sphärischen Bereich verstreut, den Halo, der weit über die flache Scheibe hinausragt, in der sich die meisten Sterne befinden. Dieser Halo zeigt uns vermutlich die Form, die das Milchstraßensystem einst hatte. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Galaxis während ihrer Entstehung und in ihrer Frühphase stark zusammengezogen haben muss.

Das hohe Alter der Kugelsternhaufen in der Milchstraße hat einen großen Einfluss auf die Erforschung ähnlicher Gebilde in anderen Galaxien gehabt. Stellen wir uns vor, ein Marsianer würde auf der Erde landen und ausschließlich ein Altersheim besuchen, in dem nur über achtzig Jahre alte Menschen wohnen. Er würde vermutlich folgern, dass auf der Erde seit achtzig Jahren keine Menschen mehr geboren wurden.

Das war in etwa die Situation der Astronomen in den 1990er Jahren. Die meisten Modelle zur Entstehung der Kugelsternhaufen basierten auf den Bedingungen im frühen Universum und gingen davon aus, dass dieser Prozess eine längst abgeschlossene Angelegenheit ist.

Vor zehn Jahren haben wir, François Schweizer von den Carnegie-Observatorien in Pasadena (Kalifornien) sowie weitere Kollegen unabhängig voneinander ein alternatives Modell vorgeschlagen, nämlich, dass die Entstehung von Kugelsternhaufen heute keineswegs beendet ist. Könnte nicht das Fehlen jüngerer Haufen lediglich ein Artefakt unserer begrenzten Beobachtungen sein? Die Kugelsternhaufen in unserer Milchstraße sind alt, keine Frage – aber wie sieht es in anderen Galaxien aus? Vielleicht entstehen diese kugelförmigen Sternzusammenballungen immer dann, wenn in einer Galaxie geeignete Bedingungen dafür herrschen.

Zum Beispiel, wenn zwei Spiralgalaxien kollidieren. In diesen Galaxien nämlich gibt es genügend Gas, aus dem neue Sterne entstehen können. Obwohl die Abstände zwischen Galaxien riesig sind, stoßen manche doch zusammen – mit zumeist dramatischen Konsequenzen. Wenn zwei kollidierende Galaxien miteinander verschmelzen, kommt es oft zu einem so genannten »Starburst«, einem explosionsartigen Anstieg der Sternentstehungsrate. Kollisionen können auch die Form der Galaxien beeinflussen – so kann aus zwei verschmelzenden Spiralgalaxien eine elliptische Galaxie entstehen.

Früher bezweifelten die Astronomen, dass es so etwas geben könnte. Der Grund: Elliptische Galaxien weisen erheblich mehr Kugelsternhaufen auf als Spiralsysteme gleicher Masse. Die Verschmelzung zweier Spiralgalaxien sollte jedoch zu einer simplen Addition der Anzahl der Kugelsternhaufen führen. Ein Überschuss an Kugelsternhaufen lässt sich nur erklären, wenn die Verschmelzung selbst neue Kugelsternhaufen hervorbringt.

Jung und Alt sind sich gleich

Um diese Idee zu untermauern, mussten die Beobachter gasreiche Galaxien auf das Vorhandensein junger Kugelsternhaufen hin untersuchen. Das Hubble-Weltraumteleskop ermöglicht solche Beobachtungen. Ohne durch die Erdatmosphäre behindert zu sein, kann dieses Observatorium ferne Galaxien – die mit bodengebundenen Teleskopen nur als verschwommene Lichtflecke sichtbar sind – in einzelne Sternhaufen auflösen. Tatsächlich stieß das Hubble-Teleskop in Starburst-Galaxien auf massereiche, dichte und junge Sternhaufen. Deren Größen und Massen sind mit denjenigen der Kugelsternhaufen in unserer Milchstraße vergleichbar. Die Haufen entstehen nur in Regionen mit intensiver Starburst-Aktivität. Galaktische Kollisionen haben also nicht nur neue Sterne zur Folge, sondern auch neue Kugelsternhaufen.

So überzeugend die Hubble-Bilder auch waren, sie schlossen den Fall nicht ab. Wie können wir sicher sein, dass diese kugelförmigen Haufen tatsächlich jüngere Versionen »unserer« Kugelsternhaufen sind? Weitere Belege waren nötig, um diese beiden Objektgruppen miteinander zu verknüpfen. Kehren wir zu unserer Analogie zurück: Wenn der Marsianer sich daran gewöhnt hat, dass die Erde nur von über achtzigjährigen Menschen bevölkert ist und dann unvermittelt mit einer Gruppe von Babys konfrontiert wird – dann würde er gewiss Beweise dafür verlangen, dass diese beiden Lebensformen wirklich der gleichen Spezies angehören.

Eine Möglichkeit, einen Zusammenhang zwischen beiden Haufenarten zu demonstrieren, wäre, in alten elliptischen Galaxien zwei unterschiedliche Populationen von Kugelsternhaufen nach-

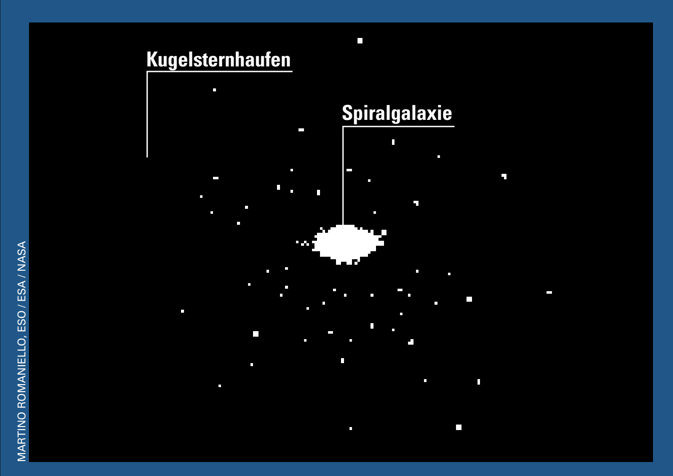
IN KÜRZE

▶ **Kugelsternhaufen** sind extrem dichte **Ansammlungen von Sternen**. In einem Volumen von einem Kubiklichtjahr drängen sich einige hundert Sterne zusammen. In der Sonnenumgebung sind es im statistischen Mittel hingegen nur 0,01 Sterne pro Kubiklichtjahr. Lange hielten die Astronomen alle Kugelsternhaufen für Relikte aus der **Frühzeit der Galaxienentwicklung**. Deshalb nutzten sie das Alter der Sterne in Kugelhaufen als untere Grenze für das **Alter des Universums**.

▶ **Neuere Forschungsergebnisse** zeigen indes, dass einige Kugelsternhaufen jung oder mittleren Alters sind. Statt in einer einzigen, frühen Phase des Kosmos sind diese Gebilde also während der gesamten Geschichte des Universums entstanden. Sie bieten uns somit Einblicke in das Geschehen, wenn **Galaxien kollidieren** und verschmelzen.

Wie Juwelen am samtschwarzen Himmel

Kugelsternhaufen sind bevorzugte Beobachtungsobjekte sowohl von Amateur- als auch von Profiastronomen. Vor zwei Jahren hat das Hubble-Weltraumteleskop dieses Bild des Kugelsternhaufens NGC 1850 (rechts) aufgenommen, der sich in der Großen Magellanschen Wolke befindet, einer Begleitgalaxie unseres Milchstraßensystems. Im Allgemeinen liegen Kugelsternhaufen verstreut in einer großen sphärischen Region um ihre Galaxie, die von den Astronomen »Halo« genannt wird. Die meisten anderen Sterne hingegen befinden sich innerhalb einer flachen Scheibe (links).



MARTINO ROMANIELLO, ESO / ESA / NASA



KEITH KASNOT

zuweisen. Wenn diese Galaxien durch die Verschmelzung von Spiralgalaxien entstanden sind, dann sollten sie sowohl die alten Kugelsternhaufen der ursprünglichen Galaxien enthalten, als auch jüngere, die bei der Verschmelzung entstanden sind. In dem von uns entwickelten Modell sollten beide Sorten von Haufen in elliptischen Galaxien etwa gleich häufig vorkommen.

Die beiden Haufenarten könnten sich zum Beispiel anhand ihrer Farbe unterscheiden lassen. Die Sterne in den neueren Kugelsternhaufen sollten nämlich einen höheren Anteil an schweren Elementen enthalten, da sie sich aus Gas gebildet haben, das bereits durch frühere Sternexplosionen mit schweren Elementen »verschmutzt« worden ist. Die alten Kugelsternhaufen in unserer Milchstraße und in anderen Galaxien enthalten hingegen meist nur wenig schwere Elemente. Der Anteil an schweren Elementen bestimmt die Farbe eines Sterns. Wenn zwei Sterne das gleiche Alter haben, dann ist derjenige mit dem höheren Anteil an schweren Elementen röter. Die Kernfusion im Zentrum des Sterns erzeugt Strahlung, die von dem Gas im Inneren des Sterns wieder absorbiert wird. Dadurch entsteht ein nach außen gerichteter Druck. Dieser gewährleistet, dass der Stern nicht unter seinem eigenen Gewicht kollabiert. Wenn nun mehr schwere Elemente vorhanden sind, dann absorbiert das Gas die Strahlung effizienter. Dadurch kann der Stern sein Gleichgewicht bei einer niedrigeren Temperatur finden. Eine niedrigere Temperatur bedeutet aber wiederum, dass der Stern röter leuchtet.

Unterschiedliche Populationen

Mit Hilfe des Hubble-Weltraumteleskops und zahlreicher Sternwarten auf der Erde konnten inzwischen die Farben vieler Kugelsternhaufen in elliptischen Galaxien bestimmt werden. Die Untersuchungen einer Astronomengruppe um Brad Whitmore vom Space Telescope Science Institute in Baltimore haben die von uns vorhergesagte bimodale Verteilung der Kugelsternhaufen bestätigt. Die meisten dieser Sternsysteme zeigen klare Anzeichen für zwei unterschiedliche Populationen von Kugelsternhaufen, einer blauen und einer roten. Dieser Befund bestätigt den Zusammenhang zwischen der Verschmelzung der Galaxien und der Entstehung neuer Kugelsternhaufen.

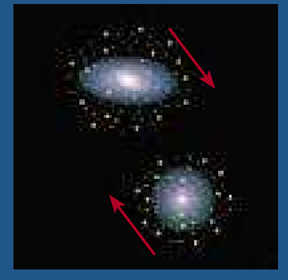
Eine andere Methode, einen Zusammenhang zwischen jungen und alten Kugelsternhaufen herzustellen, wäre, Haufen mittleren Alters zu finden – in unserem Gedankenspiel also die etwa Dreißigjährigen. Das Problem ist, dass diese »erwachsenen« Systeme sich nicht deutlich von alten Systemen unterscheiden. Junge Kugelsternhaufen sind hell, weil die in ihnen enthaltenen massereichen Sterne hell sind. Diese massereichen Sterne entwickeln sich schnell – und vergehen deshalb auch rasch. Anschließend verläuft die stellare Evolution in dem Haufen wesentlich langsamer. Deshalb sind auch die Unterschiede zwischen den »Dreißigjährigen« und den »Senioren« der Sternhaufen nur gering.

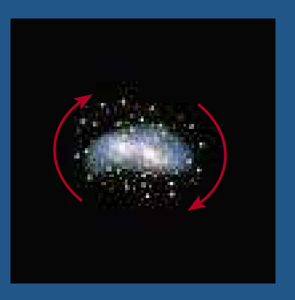
Trotz dieser Schwierigkeiten ist es kürzlich Astronomen gelungen, Kugelsternhaufen mittleren Alters in mehreren elliptischen Galaxien aufzuspüren. Einem Team, zu dem unter anderem einer von uns (Zepf) sowie Markus Kissler-Patig von der Europäischen Südsternwarte (Eso) in Garching und Thomas Puzia von der Universitätssternwarte München gehörten, gelang die Entdeckung einer großen Population mittelalter Kugelsternhaufen in einer ansonsten ziemlich normalen elliptischen Galaxie.

Weitere Untersuchungen von Schweizer, Whitmore und Paul Goudfrooij vom Space Telescope Science Institute widmeten sich inzwischen elliptischen Galaxien, die eine leicht gestörte Form auf- ▷

Kreißsaal für Kugelsternhaufen







Wie diese beiden Spiralgalaxien (links) werden in einigen Milliarden Jahren auch unser Milchstraßensystem und die nahe gelegene Andromeda-Galaxie zusammenstoßen. Was geschieht, wenn zwei derartige Sternsysteme miteinander verschmelzen, zeigt eine Computersimulati-

▷ weisen – ein Hinweis darauf, dass sie sich noch nicht vollständig entwickelt haben –, und die einige jüngere Sterne enthalten. Detaillierte Untersuchungen dieser Systeme haben bestätigt, dass auch sie über Kugelsternhaufen mittleren Alters verfügen.

Dichte Überraschungen

Somit haben wir nun also Kugelsternhaufen aller Altersstufen beobachtet – von wenige Millionen Jahre alten Systemen in Galaxien, die gerade erst miteinander verschmelzen, über einige Milliarden Jahre alte Haufen bis hin zu den zwölf Milliarden Jahre alten Exemplaren, die einst die einzigen waren, die wir kannten.

Die Entdeckung von jungen und mittelalten Kugelsternhaufen eröffnet den Forschern völlig neue Möglichkeiten, die Entstehung dieser Gebilde zu erforschen. Sie sind nicht länger Objekte, die nur in dunkler Vergangenheit entstanden, sondern ihre Entstehung lässt sich noch heute aus der Nähe und in allen Einzelheiten beobachten. Dies hat zu großen Fortschritten und zu einigen Überraschungen geführt.

Die Beobachtungen zeigen, dass das Gas in Starburst-Regionen einen hohen Druck aufweist: Er ist 100 bis 1000 Mal höher als der typische Druck in Spiralgalaxien. Der hohe Druck presst das Gas so stark zusammen, dass die für die Entstehung neuer Sterne notwendige Dichte erreicht wird. Das erklärt auch, warum sich in der Scheibe der Galaxis zwar noch Sterne, aber keine Kugelsternhaufen mehr bilden: Der Druck hat zu stark abgenommen.

Aber Starbursts sind nicht der einzige Weg, einen hohen Druck zu erzeugen.

Drei Generationen von Kugelsternhaufen

Die Kugelsternhaufen in unserem Milchstraßensystem – wie zum Beispiel M 80 (rechts) – sind sehr alt. Die Sterne in ihnen sind kaum jünger als das Universum selbst. In der Galaxie NGC 4365 (Mitte) hingegen gibt es zwei Sorten von Kugelsternhaufen: alte (rote Kreise) sowie mittelalte (blaue Kreise). In den »Antennengalaxien« NGC 4038 und 4039, die sich gerade gegenseitig durchdringen, sind die Kugelsternhaufen sogar noch jünger (ganz rechts, mit Ausschnittvergrößerung im kleinen Bild).

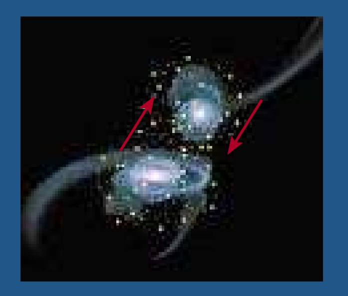
M 80 – ein alter Kugelsternhaufen



NGC 4365 enthält alte und mittelalte Kugelsternhaufen











on (Bildreihe oben). Beide Spiralgalaxien bringen jeweils ihre Kugelsternhaufen mit, die genauso alt sind wie die Galaxien selbst (gelbe Kreise). Die Spiralsysteme wirbeln umeinander, bis sich aus ihnen eine neue elliptische Galaxie gebildet hat. Durch die Kollision steigt der Gasdruck im Inneren der so entstandenen Galaxie, wodurch die Entstehung neuer Kugelsternhaufen ausgelöst wird (blaue Kreise). Die Astronomen haben vor kurzem tatsächlich elliptische Galaxien mit zwei unterschiedlichen Populationen von Kugelsternhaufen gefunden.

BILDER IN DIESEM KASTEN AUSSER LINKS: JOHN DUBINSKY, UNIVERSITY OF TORONTO

Auch die Sternentstehung im frühen Universum könnte das Gas in Zwerg- und Spiralgalaxien so stark aufgeheizt haben, dass der Druck ebenfalls stark angestiegen ist. Dadurch könnten die Kugelsternhaufen in Zwerggalaxien und in den Außenbereichen von Spiralgalaxien entstanden sein – also ohne das Erfordernis großer Verschmelzungen. (Wenn diese Galaxien solche Verschmelzungen durchlaufen hätten, dann wären sie nicht länger Zwerg- oder Spiralgalaxien.)

Eines unserer wichtigsten Forschungsergebnisse besagt, dass die Größe kürzlich entstandener Kugelsternhaufen völlig unabhängig von ihrer Masse ist. Massereichere Haufen sind demnach nicht größer, sondern dichter.

Dieser Umstand überrascht. Die Größe gravitativ gebundener Systeme – wie gewöhnlicher Sterne oder terrestrischer Planeten – wächst nämlich normalerweise mit ihrer Masse an. Die beste Erklärung, welche die Forscher gegenwärtig für diesen Befund haben, ist, dass massearme Haufen zwar zunächst kleiner sind als massereiche, dann aber einige ihrer Sterne verlieren. Dieser Massenverlust schwächt ihre Gravitation, wodurch sie langsam expandieren.

Die vielleicht interessanteste Folgerung aber ist, dass sich an den Kugelsternhaufen ablesen lässt, was im Kosmos seit dem Urknall passiert ist. Die ältesten Haufen sind Fossilien aus der frühesten Epoche der Stern- und Galaxienentstehung, die jüngeren Haufen hingegen eine Art Spiegel der Galaxienentwicklung bis in die heutige Zeit. Die Kugelsternhaufen erlauben uns also eine Zeitreise durch die vielschichtige Geschichte des Universums. ◁

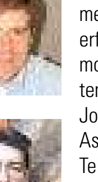
NGC 4038/4039 mit jungen Kugelsternhaufen



BRAD WHITMORE, SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Stephen E. Zepf (oben) und **Keith M. Ashman** begannen gemeinsam Kugelsternhaufen zu erforschen, als sie beide in Baltimore (Massachusetts) arbeiteten, Zepf als Doktorand an der Johns-Hopkins-Universität und Ashman als Postdoc am Space Telescope Science Institute. Zepf ist jetzt Professor für Physik und Astronomie an der Michigan State University in East Lansing. Ashman, geboren in London, wechselte unlängst an die Fakultät für Physik der Universität von Missouri in Kansas City.

Galaxien vom Urknall bis heute – Teil 1: Kollisionen. Von Andreas Burkert und Matthias Steinmetz in: Sterne und Weltraum Special 1/03 »Das junge Universum«. Heidelberg 2003

Globular cluster systems. Von K. M. Ashman und S. E. Zepf. Cambridge University Press, 1998

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Warum schlafen wir?

Jede Nacht versinken wir für Stunden in einen bewusstlosen Dämmerzustand, der durchzuckt wird von den Irrlichtern der Träume. Die Wissenschaft tut sich schwer, den Sinn dieser seltsamen Auszeit des Geistes zu verstehen; doch allmählich wächst die Liste der gesicherten Erkenntnisse darüber.

Von Jerome M. Siegel

Vögel tun es, Bienen tun es, und sogar Taufliegen scheinen es zu tun. Menschen tun es auf jeden Fall. Doch im Unterschied zu Cole Porters bekanntem Song meine ich nicht die Liebe, sondern den Schlaf – jenen seltsamen Zustand, »der des Grams verworr'n Gespinst entwirrt«, wie Shakespeares Macbeth sagt, »den Balsam kranker Seelen, den zweiten Gang im Gastmahl der Natur, das nährendste Gericht beim Fest des Lebens«. Prosaischer, aber nicht weniger hymnisch preist Cervantes' Sancho Pansa den Schlaf als »das Gericht, das den Hunger vertreibt, das Wasser, das den Durst in die Flucht schlägt, das Feuer, das die Kälte erwärmt, die Kälte, die die Hitze mäßigt, … die Waage und das Gewicht, womit der Hirte und der König, der Einfältige und der gescheite Kopf gleich abgewogen und gleich schwer befunden werden«.

Einfältige und gescheite Köpfe grübeln schon lange über zwei eng verwandte Rätsel: Was ist Schlaf und warum brauchen wir ihn? Auf die zweite Frage mag mancher spontan antworten: um aufmerksam und wach zu bleiben. Aber das ist keine wirkliche Erklärung. Ebenso gut könnte man sagen, dass wir essen, um nicht zu verhungern, und atmen, um nicht zu ersticken. Die eigentliche Funktion des Essens besteht jedoch in der Zufuhr von Nährstoffen, und wir atmen, um Sauerstoff aufzunehmen und Kohlenstoffdioxid auszuscheiden.

Für den Schlaf gibt es leider noch keine ähnlich einfache Erklärung. Doch hat die Schlafforschung – die als eigenständige Disziplin erst knapp ein Jahrhundert alt ist – inzwischen eine Fülle an Erkenntnissen zusammengetragen. Dadurch lassen sich über die Funktion des Dämmerzustands, der ein Drittel unseres Lebens verschlingt, zumindest einige fundierte Hypothesen aufstellen.

Ein schwer fassbarer Zustand

Nach der Definition von Obszönität befragt, gab Potter Steward, Richter am obersten Gerichtshof der USA, im Jahre 1964 die denkwürdige Antwort: »Ich erkenne sie, wenn ich sie sehe.« Mit dem Schlaf verhält es sich ähnlich. Auch wenn es uns schwer fällt, ihn genau zu definieren, können wir normalerweise mühelos feststellen, ob eine Person schläft. Sie nimmt ihre Umwelt dann kaum noch wahr und verharrt meist bewegungslos mit geschlossenen Augen. (Allerdings schwimmen Delfine und andere Meeressäuger auch beim Schlafen, und einige Zugvögel schlafen während ihrer langen Wanderungen im Flug.)

Schlaf lässt sich an einer Reihe von Merkmalen wie den geschlossenen Augen ziemlich leicht erkennen. Trotzdem ist er nur schwer exakt zu definieren.

Nathaniel Kleitman, ein Pionier der Schlafforschung, und sein Schüler Eugene Aserinsky von der Universität Chicago räumten 1953 mit dem bis dahin verbreiteten Glauben auf, wonach das Gehirn im Schlaf einfach einen Großteil seiner Aktivität einstellt. Sie entdeckten, dass in diesem unbewussten Zustand Phasen schneller Augenbewegungen *(rapid eye movements)* auftreten, weshalb man heute von REM-Schlaf spricht. Seine Existenz wies auf irgendeine Art spezieller Gehirnaktivität hin. Alle bisher untersuchten Landsäugetiere zeigen ihn. Er wechselt in regelmäßigen Zyklen mit Non-REM-Schlafphasen ab, für die ich hier den wissenschaftlich nicht ganz sauberen, aber anschaulichen Begriff Tiefschlaf verwenden möchte.

Die größten Fortschritte in neuerer Zeit gab es auf der Ebene einzelner Nervenzellen im Gehirn. In den letzten zwanzig Jahren haben Forscher gelernt, extrem feine Drähte mit nur 32 Mikrometer Durchmesser – was den dünnsten menschlichen Haaren entspricht – zielgenau in beliebige Gehirnregionen einzuführen. Einmal implantiert, verursachen sie keine Schmerzen. Mit ihrer Hilfe wurde bei Menschen und vielen

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Labortieren im Wachen und Schlafen die Gehirnaktivität registriert. Erwartungsgemäß ergab sich, dass die meisten Nervenzellen am stärksten feuern, wenn die Versuchsperson eine bewusste Tätigkeit ausübt. Aber das neuronale Geschehen während des Schlafs ist überraschend variabel. So zeigt das Gehirn im REM- und Non-REM-Schlaf ein völlig anderes Aktivitätsmuster, obwohl sich die Körperhaltung nicht unterscheidet und die Empfänglichkeit für Umweltreize gleichermaßen eingeschränkt ist.

Während des Tiefschlafs stellen die meisten Neuronen im Hirnstamm – der Region unmittelbar oberhalb der Wirbelsäule – das Feuern ein oder reduzieren es deutlich. In der Großhirnrinde und den angrenzenden Regionen des Vorderhirns geht die Aktivität dagegen nur leicht zurück. Am deutlichsten ändert sich hier das Aktivitätsmuster als Ganzes. Im Wachzustand geht jedes Neuron weitgehend seinen eigenen Geschäften nach. Doch im Tiefschlaf beginnen benachbarte Nervenzellen mit niedriger Frequenz synchron zu feuern. Paradoxerweise erzeugt diese einheitliche elektrische Aktivität Gehirnwellen größerer Amplitude als im Wachen, obwohl weniger Energie verbraucht wird.

Nur eine sehr kleine Gruppe von Nervenzellen an der Basis des Großhirns (beim Menschen insgesamt wohl nicht mehr als 100 000) ist während des Tiefschlafs maximal aktiv und scheint das Hinübergleiten in den Schlummer auszulösen. Welche Signale diese »Schlafneuronen« *(sleep-on neurons)* zum Feuern anregen, ist noch nicht genau bekannt. Aber ein Anstieg der Körpertemperatur im Wachzustand trägt zumindest zu ihrer Aktivierung bei. Dies könnte die Schläfrigkeit nach einem heißen Bad oder während eines sonnigen Sommertags am Strand erklären.

Rückfall in die Kaltblütigkeit

Der REM-Schlaf ähnelt hingegen in mancher Hinsicht dem Wachzustand. Die Gehirnwellen bleiben klein, weil die Neuronen unabhängig voneinander feuern. Und die meisten Nervenzellen im Großhirn und im Hirnstamm sind recht aktiv. Sie funken ihre Partner mindestens genauso oft an wie im Wachen, weshalb auch der Gesamtenergieverbrauch ähnlich hoch ist. Am betriebsamsten geht es während der Zuckungen und Augenbewegungen zu, denen der REM-Schlaf seinen Namen verdankt. Bestimmte Zellen im Hirnstamm, so genannte REM-Schlafzellen, arbeiten während dieses Stadiums auf Hochtouren und scheinen es auszulösen.

Im REM-Schlaf haben wir unsere lebhaftesten Träume. Dabei werden oft auch die motorischen Felder im Gehirn in Erregung versetzt, die sonst nur bei wachen, sich regenden Personen in Aktion treten. Allerdings unterdrücken zwei sich ergänzende biochemische Prozesse die meisten Körperbewegungen.

Die entscheidende Rolle spielen dabei so genannte Neurotransmitter: Botenstoffe, die Signale an einer speziellen Kontaktstelle (Synapse) von einem Neuron zum anderen übertragen. Das Gehirn stoppt die Produktion derjenigen Neurotransmitter, welche die Motoneuronen anregen würden – also die Nervenzellen, die für die Steuerung der Muskeln zuständig sind. Stattdessen setzt es andere Botenstoffe frei, die Motoneu- ▷

▷ ronen aktiv blockieren. Allerdings sind die Nervenzellen, die zu den am Augapfel ansetzenden Muskeln führen, von beiden Maßnahmen nicht betroffen. Deshalb werden die schnellen Augenbewegungen nicht unterbunden.

Auch auf Gehirnsysteme, welche die inneren Organe kontrollieren, hat der REM-Schlaf großen Einfluss. Beispielsweise schwanken Pulsrate und Atemfrequenz, die im Tiefschlaf sehr gleichmäßig sind, ebenso stark wie im Wachzustand. Außerdem ist die Regulation der Körpertemperatur eingeschränkt, sodass wir in gewissem Maße auf die Stufe kaltblütiger Reptilien zurückfallen, die sich der jeweiligen Umgebungstemperatur anpassen. Schließlich bekommen Männer oft Erektionen, während bei Frauen die Klitoris anschwillt, obwohl die meisten Träume keine sexuellen Inhalte haben.

Die gravierenden Folgen von Schlafentzug

Mit dieser kompakten Übersicht ist auch schon so ziemlich alles Wesentliche gesagt, was wir derzeit auf der phänomenologischen wie der neuronalen Ebene über den Schlaf wissen. Die geschilderten Fakten sind zwar durchaus interessant, bleiben aber dennoch so unbefriedigend, als würde man geweckt, bevor man richtig ausgeschlafen hat. Vor allem fehlt die Antwort auf die eine große Frage: Wozu ist der Schlaf gut?

Auf einer Konferenz der Schlafforscher im vergangenen Juni erklärte ein Teilnehmer, die Funktion des Schlafs sei nach wie vor mysteriös. Die Vorsitzende widersprach heftig, blieb aber die genaue Begründung schuldig, weshalb sie das Rätsel des Schlafs für gelöst hält. Offensichtlich gibt es zu diesem Thema noch keine einhellige Meinung. Auf Basis der bis heute gesammelten Erkenntnisse lassen sich jedoch einige Hypothesen aufstellen, die viele meiner Fachkollegen für plausibel, ja überzeugend halten.

Um etwas über die Funktion des Schlafs zu erfahren, kann man zunächst einmal einfach prüfen, wie sich Schlafmangel auf physiologische Prozesse und das allgemeine Verhalten auswirkt. Vor über einem Jahrzehnt schon stellte sich heraus, dass Ratten bei Schlafentzug innerhalb von zehn bis zwanzig Tagen sterben – schneller, als wenn man ihnen jegliches Futter verweigern würde. Die Tiere magern ab, obwohl sie viel mehr fressen als sonst. Puls und Energieverbrauch sind erhöht. Dies deutet auf übermäßige Wärmeverluste hin. Die genaue Todesursache ist aber noch unklar.

Beim Menschen führt die Fatale Familiäre Insomnie (FFI) – eine sehr seltene degenerative Gehirnerkrankung – innerhalb weniger Monate zum Tod. Ob aber die namensgebende Schlaflosigkeit selbst oder ein anderer Aspekt der Hirnschädigung tödlich wirkt, ist noch nicht bekannt. Statistischen Untersuchungen zufolge korreliert das durchschnittliche Schlafpensum mit der Lebenserwartung: Sie ist bei etwa sieben Stunden Schlaf pro Nacht am höchsten.

Studien zum Schlafentzug beim Menschen zeigen, dass schon eine kleine Reduzierung der nächtlichen Schlafdauer ständig wachsende Müdigkeit erzeugt. Das Schlafbedürfnis ist so unbezwingbar, dass man die Versuchspersonen häufig und heftig rütteln muss, um sie wach zu halten. Bei solchen Experimenten sehen sich die Forscher daher schon bald mit der Frage konfrontiert, ob die beobachteten Effekte wirklich vom Schlafentzug oder vom Stress durch die Versuchsbedingungen stammen.

Übermüdung ist genauso gefährlich wie Alkohol, wenn es darum geht, Auto zu fahren oder andere Dinge zu tun, die ununterbrochene Wachsamkeit erfordern. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse deuten aber auch darauf hin, dass es nicht gesundheitsförderlich ist, ja unter Umständen die Lebenserwartung verkürzt, wenn man über längere Zeit hinweg Schlaftabletten nimmt.

Körpergröße bestimmt Schlafdauer

Hinweise auf die Funktion des Schlafs kann auch ein Vergleich der natürlichen Schlafgewohnheiten verschiedener Tierarten geben. So existiert eine enorme Spannbreite beim Schlafpensum im Tierreich. Beispielsweise döst ein Opossum 18 Stunden am Tag, während ein Elefant mit drei bis vier Stunden Schlaf auskommt. Die Vermutung liegt nahe, dass eng verwandte Arten, die sich in physiologischer und genetischer Hinsicht sowie im Verhalten gleichen, auch ähnliche Schlafgewohnheiten haben.

Tatsächlich aber besteht, wie aus Studien an Tieren im Labor, im Zoo und in freier Wildbahn hervorgeht, keine Verbindung zwischen Schlafdauer und taxonomischer Stellung: Die Spannbreite der Schlafzeiten von Primaten überschneidet sich stark mit der von Nagetieren, die sich wiederum mit der von Raubtieren überlappt; Ähnliches gilt für viele Säugetierordnungen. Aber wenn Verwandtschaftsbeziehungen keinen Rückschluss auf das Schlafbedürfnis gestatten, was ist dann der maßgebliche Faktor?

Die überraschende Antwort lautet: die Körpergröße. Elefanten, Giraffen und Menschenaffen (einschließlich des Menschen) kommen mit recht wenig Schlaf aus. Ratten, Katzen, Wühlmäuse und andere kleine Tiere dösen dagegen die meiste Zeit. Ihr großes Schlafbedürfnis hängt offenbar damit zusammen, dass sie einen aktiveren Stoffwechsel sowie höhere Gehirn- und Körpertemperaturen als große Tiere haben.

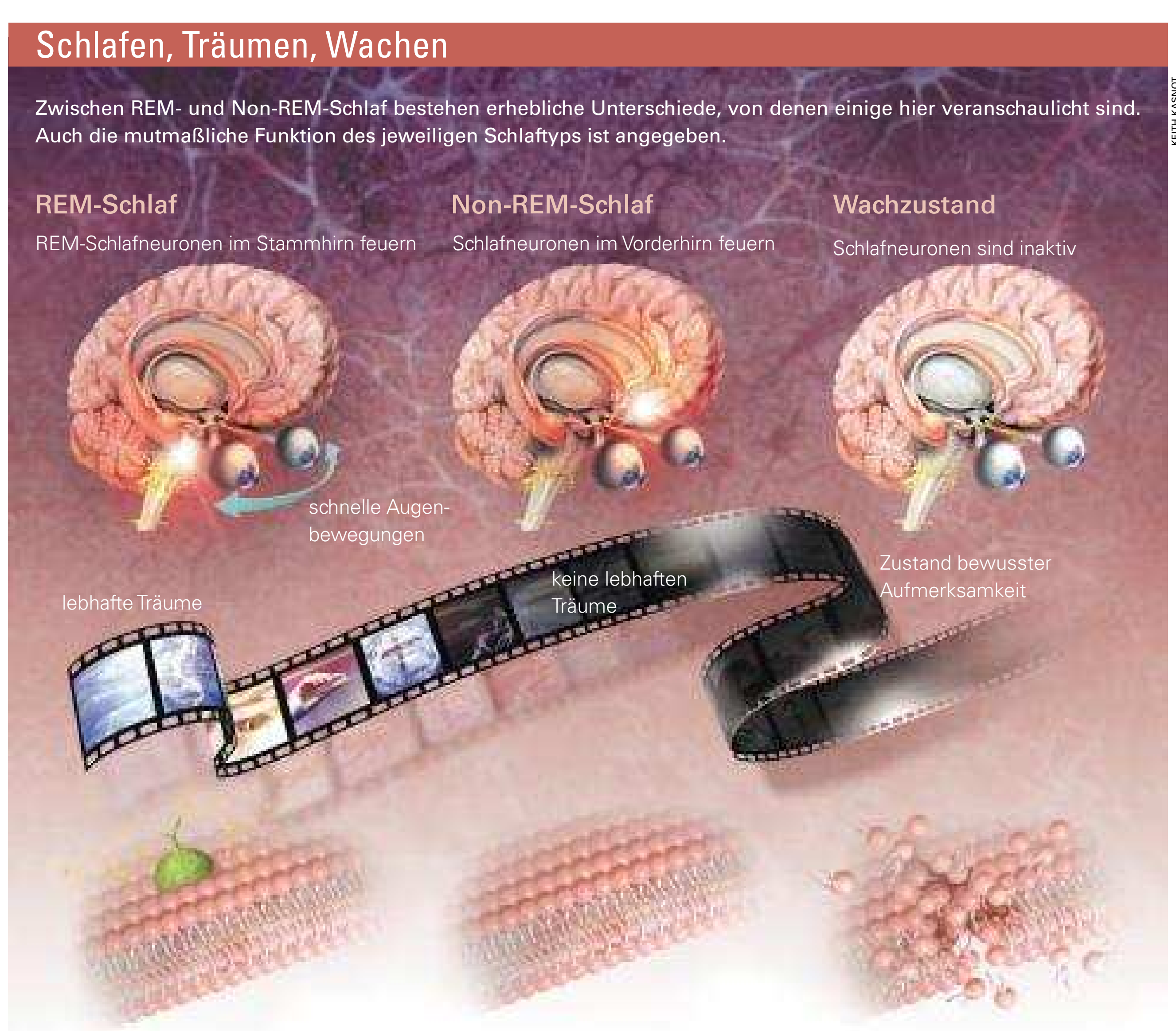
Der Stoffwechsel ist bekanntlich eine unsaubere Sache, bei der unter anderem freie Radikale entstehen: hochreaktive Molekülbruchstücke, die Zellen schädigen oder sogar abtöten können. Je höher die Stoffwechselrate, desto größer sind also die Defekte, die an Zellbestandteilen wie Nucleinsäuren, Proteinen und Fettstoffen auftreten.

In vielen Geweben lässt sich für Zellen, die von freien Radikalen beschädigt wurden, durch Teilung Ersatz schaffen. Aber die meisten Gehirnregionen produzieren nach der Geburt fast keine neuen Zellen mehr – eine nennenswerte Aus-

IN KÜRZE

- Beim Schlaf wechseln sich **REM- und Non-REM-Phasen** ab. Ihre Funktion ist noch immer umstritten, aber neue Erkenntnisse erlauben einige fundierte Hypothesen.
- Eine davon besagt, dass die reduzierte Aktivität im Gehirn beim Non-REM-Schlaf vom Stoffwechsel geschädigten Hirnzellen **Gelegenheit zur Reparatur** gibt.
- Einer anderen Hypothese zufolge wird im REM-Schlaf die Ausschüttung bestimmter **Botenstoffe** unterbunden, damit die zugehörigen Rezeptoren sich erholen können.
- Die intensive **neuronale Aktivität** beim REM-Schlaf könnte in frühen Lebensstadien die nötigen Reize für die normale **Hirnentwicklung** liefern.

Schlafen, Träumen, Wachen



Die Ausschüttung bestimmter Neurotransmitter ist gehemmt. Die Rezeptoren, die normalerweise von diesen Botenstoffen aktiviert werden, können sich so erholen.

Die meisten Hirnzellen verfallen in einen Ruhezustand, der vermutlich zur Reparatur von Membranen dient, die von freien Radikalen geschädigt wurden.

Freie Radikale, die als Nebenprodukte des Stoffwechsels in aktiven Nervenzellen entstehen, schädigen deren Außenmembran.

nahme macht nur der Hippocampus, der für Lernen und Gedächtnis von zentraler Bedeutung ist. Die geringere Stoffwechselrate und Gehirntemperatur während des Tiefschlafs scheint Reparaturenzymen die Gelegenheit zu bieten, die Schäden zu beheben, die während des Wachens im Gehirn entstanden sind.

Zugleich könnten ältere Enzyme, die selbst schon unter freien Radikalen gelitten haben, durch neu synthetisierte Exemplare mit einwandfreier Struktur ersetzt werden. Einen ersten experimentellen Beleg für diese Hypothese lieferte vor zwei Jahren meine Arbeitsgruppe an der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Wir fanden als Resultat von Schlafentzug bei Ratten Schäden an der Außenmembran von Hirnzellen.

Gebremste Botenstoff-Ausschüttung

Dagegen ist der REM-Schlaf nach wie vor ziemlich rätselhaft. Die Zellreparatur-Hypothese verfängt hier nicht, weil die meisten Hirnzellen während dieser Schlafphase wenigstens genauso aktiv wie im Wachzustand sind.

Allerdings gibt es Ausnahmen. Vielleicht erinnern Sie sich, dass die Produktion einiger Neurotransmitter während des REM-Schlafs gestoppt wird, was Körperbewegungen unterdrückt. Betroffen sind vor allem die Botenstoffe Noradrenalin, Serotonin und Histamin, die zu den so genannten Monoaminen gehören, weil sie jeweils genau eine Aminogruppe enthalten. Hirnzellen, die diese Neurotransmitter herstellen, arbeiten im Wachen durchgehend auf Hochtouren. Aber während des REM-Schlafs verstummen sie völlig, wie Dennis McGinty und Ronald Harper von der Universität von Kalifornien in Los Angeles schon 1973 herausfanden.

Michael Rogawski von den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) und ich brachten 1988 eine mögliche Erklärung dafür vor. Demnach dient ▷

▷ der Stopp der Transmitterfreisetzung dazu, das langfristige Funktionieren jener Rezeptoren zu gewährleisten, die nach der Anlagerung eines Monoamins das erhaltene Signal ins Innere der Zelle weiterleiten. Untersuchungen zufolge stumpfen sie bei ständiger Aktivierung ab. Die Unterbrechung der Monoamin-Ausschüttung während des REM-Schlafs könnte ihnen also eine Erholungspause verschaffen, um die volle Erregbarkeit zurückzuerlangen und dann im Wachzustand wieder ihre Aufgabe bei der Steuerung von Emotionen zu erfüllen. Tatsächlich hängt das seelische Gleichgewicht entscheidend vom reibungslosen Zusammenspiel zwischen Neurotransmittern und ihren Rezeptoren ab. So sorgen die Stimmungsaufheller Fluctin, Tagonis und Fevarin dafür, dass Serotonin länger in hoher Konzentration an Synapsen vorliegt, indem sie seine Wiederaufnahme in die Zelle hemmen.

Monoamine sind auch beteiligt, wenn das Gehirn auf Grund neuer Erfahrungen anders »verdrahtet« wird. Der Stopp ihrer Produktion beim REM-Schlaf könnte daher zugleich verhindern helfen, dass sich beim Träumen das neuronale Verknüpfungsmuster versehentlich ändert – was wegen der intensiven Aktivität vieler Hirnzellen in dieser Schlafphase sonst unweigerlich geschähe.

Wie viel Schlaf?

Wie lange ein Tier am Tag insgesamt schläft, scheint von seiner Körpergröße abzuhängen. Im Allgemeinen gilt: Je größer das Tier, desto weniger Schlaf braucht es. Das spricht für die Vermutung, dass der Schlaf unter anderem zur Reparatur geschädigter Hirnzellen dient. Denn kleinere Tiere benötigen mehr Energie und haben daher eine höhere Stoffwechselrate, sodass ihre Zellen stärker geschädigt werden.



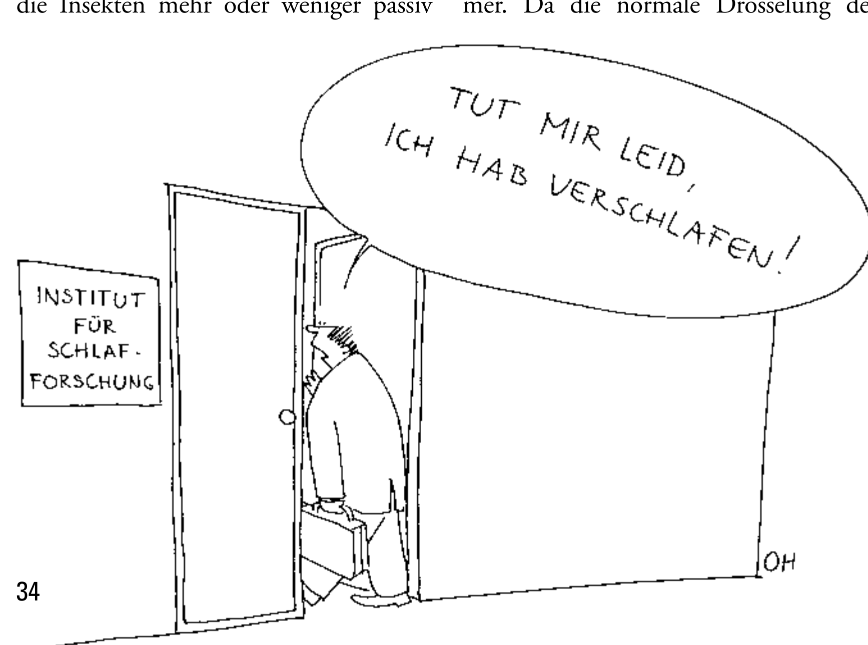
Das Nickerchen der Fliegen

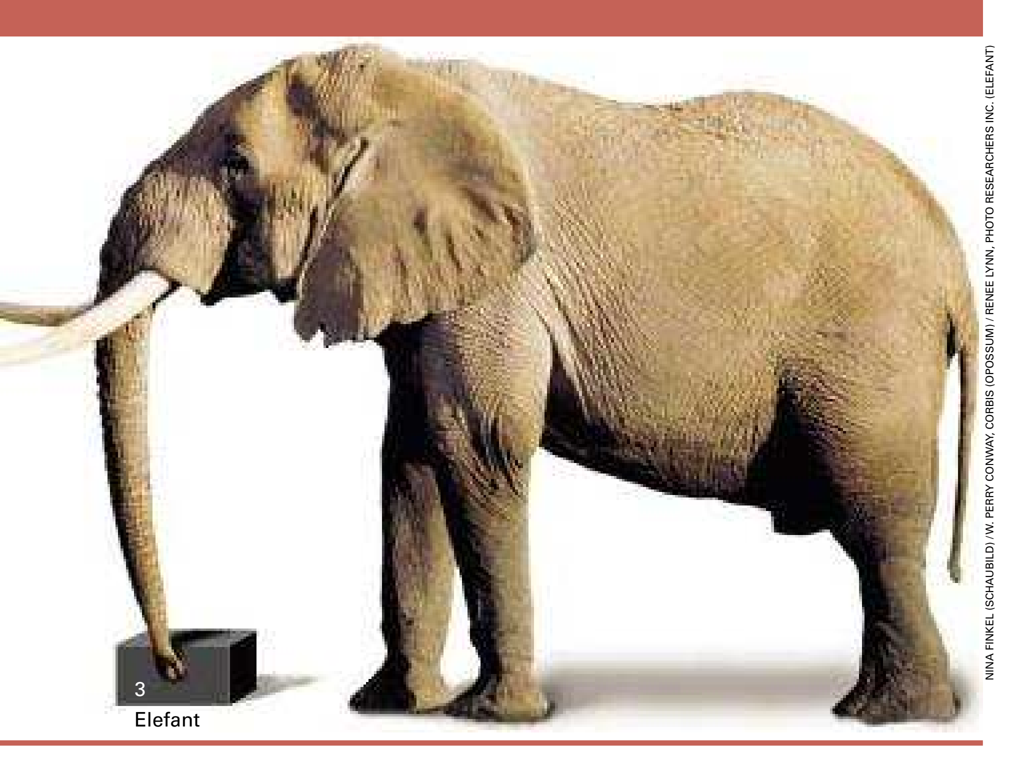
Vor vier Jahren machte ein Team um Paul J. Shaw am Neurosciences Institute in La Jolla (Kalifornien) bei Taufliegen eine interessante Beobachtung. Es entdeckte einen Zusammenhang zwischen der Konzentration an Monoaminen und schlafähnlichen Perioden, in denen sich die Insekten mehr oder weniger passiv verhalten. Wenn man sie bei ihrem Nickerchen stört, erhöht sich wie beim Menschen die Botenstoffmenge. Demnach hat sich die regelmäßige Ruhe zur Wiederherstellung der Neurotransmitterfunktion schon lange vor dem Auftreten der Säugetiere entwickelt.

Was könnte der REM-Schlaf noch bewirken? Ältere Vorstellungen, wonach sein Entzug Geisteskrankheiten verursachen soll, sind überzeugend widerlegt worden. Ein Mangel an REM-Schlaf kann im Gegenteil sogar Depressionen lindern. Der Grund dafür ist noch nicht mit letzter Sicherheit bekannt. Man vermutet aber eine Parallele zur Wirkung der Serotonin-Wiederaufnahme-Hemmer. Da die normale Drosselung der Monoamin-Ausschüttung während des REM-Schlafs unterbleibt, steigt die synaptische Konzentration dieser Neurotransmitter, die bei depressiven Patienten krankhaft erniedrigt ist.

Einige Forscher vertreten die Ansicht, dass der REM-Schlaf eine Rolle bei der Festigung von Gedächtnisinhalten spielen könnte. Die Belege dafür sind aber schwach und widersprüchlich, wie ich vor einiger Zeit detailliert ausgeführt habe *(Science, 2. 11. 2001, S. 1058).* Gegen diese Vermutung sprechen zudem Versuche an Menschen, bei denen der REM-Schlaf medikamentös unterdrückt wurde oder wegen einer Hirnschädigung prinzipiell nicht auftritt. Beide Personengruppen erbringen in Experimenten normale – oder sogar verbesserte – Gedächtnisleistungen. Ein Mangel an REM-Schlaf im Anschluss an eine Phase konzentrierten Lernens scheint in keiner Weise das Behalten der neuen Informationen zu beeinflussen. Außerdem zeigen Delfine, bei denen diese Schlafphase fast gar nicht vorkommt, dennoch beeindruckende Lern- und Intelligenzleistungen.

Überhaupt gibt es keinerlei Anhaltspunkte, dass die Lernfähigkeit einer Art mit ihrer REM-Schlafdauer zusammenhängt. Im Gegenteil: Menschen verbringen im Vergleich zu anderen Säugetieren nicht besonders viel Zeit in dieser Schlafphase – 90 bis 120 Minuten pro Nacht. Außerdem ist die REM-Schlafdauer bei




3
Elefant

NINA FINKEL (SCHAUBILD) / W. PERRY CONWAY, CORBIS (OPOSSUM) / RENEE LYNN, PHOTO RESEARCHERS INC. (ELEFANT)

Personen mit höherem IQ oder besseren Schulleistungen nicht länger – oder kürzer – als bei anderen. Allerdings ändert sie sich mit dem Lebensalter. Bei allen untersuchten Tierarten ist der Anteil des REM-Schlafs in jungen Jahren am höchsten und sinkt im Erwachsenenalter langsam auf ein konstantes Niveau.

Der Vergleich vieler Arten zeigt jedoch einen anderen faszinierenden Zusammenhang. Danach ist der zuverlässigste Indikator für die REM-Schlafmenge, die ein erwachsenes Tier braucht, der Reifegrad der Nachkommen zum Zeitpunkt der Geburt.

Träumen für die Nervenreifung

Am einen Ende der Skala befindet sich das Schnabeltier, das ich zusammen mit Jack Pattigrew und Paul Manger von der Universität von Queensland in Brisbane (Australien) 1999 untersucht habe. Dieser älteste noch lebende Vertreter der Säugetiere erwies sich überraschend als Rekord-REM-Schläfer: Er verbringt gut acht Stunden täglich in dieser Schlafphase. Passend dazu werden seine Jungen völlig hilflos und blind geboren, sind also ausgeprägte »Nesthocker«. Unfähig, den Wärmehaushalt zu regulieren oder selbstständig Nahrung zu finden, bleiben sie noch wochenlang ans Muttertier geklammert. Das andere Extrem markieren die Delfine, die, wie erwähnt, fast keinen REM-Schlaf brauchen. Ihre Neugeborenen sind »Nestflüchter«: Sie können auf Anhieb die Körpertemperatur halten, schwimmen, ihrer Mutter folgen und Fressfeinden ausweichen.

Eine interessante Erklärung für das große REM-Schlafbedürfnis von Nesthockern gibt Michel Jouvet, ein Pionier der Schlafforschung, der vor vier Jahrzehnten herausfand, dass der Hirnstamm für die Steuerung des REM-Schlafs verantwortlich ist. Seiner Ansicht nach ist die intensive neuronale Aktivität in dieser Schlafphase wichtig für die Ausbildung der genetisch festgelegten Nervenverbindungen, die das so genannte Instinktverhalten ermöglichen. In der Gebärmutter und bei Jungtieren mit verzögerter Entwicklung der Sinnesorgane könnte der REM-Schlaf als Ersatz für jene Umweltreize dienen, die das Nervensystem zu seiner Reifung braucht und denen Nestflüchter von Geburt an ausgesetzt sind.

Untersuchungen der Gruppe von Howard Roffward, Leiter des Schlafstörungszentrums am Medical Center der Universität von Mississippi in Jackson, bestätigen das. Danach entwickelt sich das visuelle System von Katzen anomal, wenn man sie in den ersten Tagen nach der Geburt am REM-Schlaf hindert.

Allerdings hat diese Theorie einen Schwachpunkt: Warum brauchen Tiere, die als Nesthocker zur Welt kommen, auch als Erwachsene noch relativ viel REM-Schlaf? Evolutionsbiologisch betrachtet, erscheint das als Nachteil. Da der REM-Schlaf mit einer hohen Stoffwechselrate einhergeht, sollten Tiere, die lange in ihm verharren, einen größeren Bedarf an Nährstoffen haben. Dadurch können sie weniger Zeit und Energie für die Aufzucht von Nachkommen verwenden, was sich negativ auf ihre Fortpflanzungsrate auswirkt. Zum Ausgleich dafür müssen sie auch im Erwachsenenalter noch einen besonderen Nutzen aus dem REM-Schlaf ziehen, der Nestflüchtern vorenthalten bleibt. Worin er bestehen könnte, ist aber noch völlig unklar.

Obwohl der momentane Wissensstand noch so manche Lücke aufweist, sind meine Kollegen und ich zuversichtlich, bald ein umfassendes und zufrieden stellendes Verständnis des Schlafs und seiner Bedeutung zu erlangen. Fortschritte erwarten wir insbesondere von der genaueren Identifizierung und Charakterisierung der Hirnregionen, welche die verschiedenen Schlafphasen steuern.

Parallel dazu geht die Erforschung der Mechanismen und der Evolution des Schlafs weiter – mit dem Ziel, noch besser zu erkennen, welche Reparatur- und Regenerationsprozesse dabei ablaufen. Dies dürfte auch klar machen, warum der Dämmerzustand die besten Bedingungen für derlei Wartungsarbeiten bietet – und warum das Entwirren von Shakespeares verworrenem Gespinst des Grams uns befähigt, die Anforderungen des Alltags immer wieder aufs Neue hellwach zu meistern. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Jerome M. Siegel ist Professor für Psychiatrie an der Universität von Kalifornien in Los Angeles und ehemaliger Präsident der amerikanischen Sleep Research Society. Außerdem leitet er die Abteilung für Neurobiologische Forschung am Veterans Affairs Medical Center in Sepulveda. Momentan hat er seine nächtliche Schlafdauer auf etwa sechs Stunden verkürzt, damit er seine Tochter morgens um 7 Uhr zur Schule bringen kann.

Was Sie schon immer über Schlaf wissen wollten. Von B. Saletu und G. M. Saletu Zyhlarz. Ueberreuter, Wien 2001

Rätselhafter Schlafzwang. Von Jerome M. Siegel in: Spektrum der Wissenschaft, 4/2000, S. 34

Schlaf und Schlafstörungen. Von J. Röschke und K. Mann. C.H. Beck, München 1998

Aktuelle psychophysiologische Schlafforschung. Von Ch. Becker-Carus. LIT Verlag, Münster 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Sicherungen

Wächter des Leitungsnetzes

Von Bernhard Gerl

Wenn in der Wohnung plötzlich die Lichter ausgehen, hat vermutlich ein kleines elektrisches Bauteil seinen ordnungsgemäßen Dienst verrichtet: die Sicherung. Sie schreitet ein, wenn in einer Leitung zu viel Strom fließt. So wird verhindert, dass durch die entstehende Wärme der Draht schmilzt oder gar das Kabel zu glimmen beginnt. Erst in zweiter Linie schützt eine Sicherung auch Menschen gegen Stromschlag.

Vom Verteilerkasten zweigen ein oder mehrere Stromkreise je Zimmer ab. Alle Leitungen sind nach dem zu erwartenden Verbrauch auf eine bestimmte Stromstärke beziehungsweise Leistung ausgelegt: Für normale Wohnräume, in denen nur Lampen und andere Kleinverbraucher wie Fernseher oder Stereoanlagen betrieben werden, sind meist zehn Ampere beziehungsweise etwa zwei Kilowatt vorgesehen, für die Küche mit Herd und Spülmaschine rechnet man mit 16 Ampere, also rund drei Kilowatt.

Diese Spannen sind allerdings schnell erreicht: Ein Computer benötigt zirka ein Kilowatt, noch ein Staubsauger mit eineinhalb Kilowatt dazu, schon ist die Grenze der Wohnräume um 25 Prozent überschritten. Einige Geräte wie Elektromotoren erfordern zudem beim Einschalten etwas höhere Stromstärken als im Betrieb. Allerdings reagiert die Sicherung bei so einer »geringfügigen« Überlast frühestens nach zehn Minuten.

Die größere Gefahr geht von Kurzschlüssen aus, bei denen mehrere tausend Ampere durch zwei elektrische Leiter ohne dazwischengeschalteten Widerstand fließen. Bevor diese durchglühen, werden Schmelzsicherungen (Grafik oben) oder Leitungsschutzschalter (rechts) aktiv. Erstere bestehen aus einem Keramikkörper mit Metallhülsen an beiden Enden, die als Kontakte dienen. Im Inneren verläuft ein Draht. Bei einer vorgegebenen Nennstromstärke von zum Beispiel zehn Ampere schmilzt der Draht und unterbricht damit den Stromkreis. Nachdem die Ursache für die Überlastung des Stromkreises beseitigt ist, muss eine neue Sicherung eingedreht werden.

Im Leitungsschutzschalter dagegen sind die Funktionen für Kurzschlussströme und kurzfristig zu hohe Leistungen getrennt. Erst wenn die Stromstärke das Dreifache des Nennwerts übersteigt – ein deutlicher Hinweis auf einen Kurzschluss –, öffnet ein Elektromagnet den Stromkreis. Bei einer länger dauernden Überlastung der Leitung durch zu viele Verbraucher erwärmt sich ein Bimetallstreifen, biegt sich und beendet damit den Stromfluss. Besonders bequem ist beim Leitungsschutzschalter, dass er über einen Knopf oder Hebel einfach wieder eingeschaltet werden kann. Auch bei Reparaturen an elektrischen Leitungen kann mit diesem Schalter der Strom in einem Raum problemlos abgestellt werden. ◁

Bernhard Gerl ist Physiker und Fachautor in Regensburg.

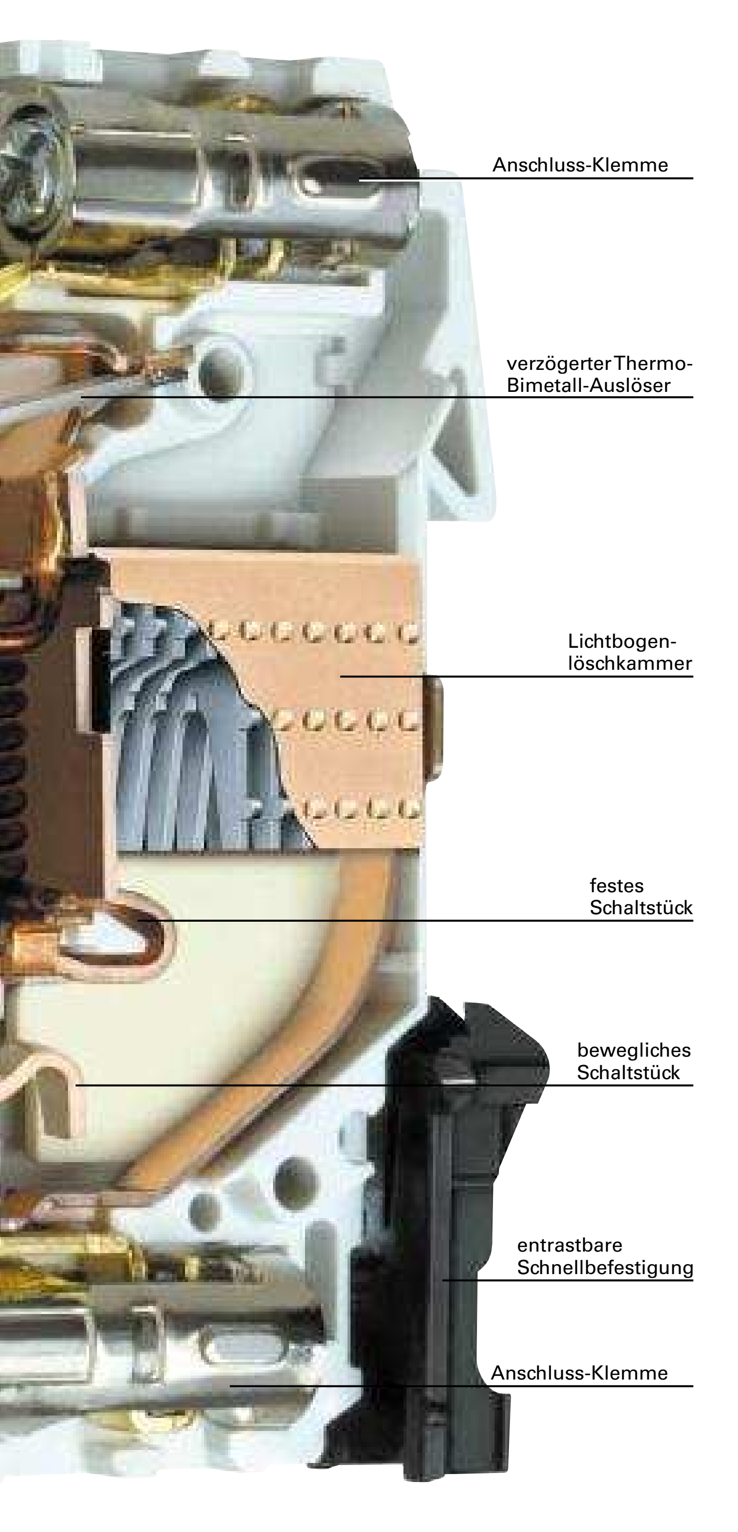
THOMAS BRAUN NACH BERNHARD GERL

Kontakt
Keramikkörper
Quarzsandfüllung
Schmelzleiter
Kontakt

Entklinkungsschieber
unverzögerter Elektromagnet-Auslöser mit Schlaganker
Schaltgriff
Schaltwerk mit Federkraftspeicher zum Ausschalten

ABB / STOTZ-KONTAKT GMBH

Eine Schmelzsicherung besteht aus einem Keramikkörper mit einem meist mit Quarzsand gefüllten Hohlraum, durch den ein dünner Silberdraht – der Schmelzleiter – führt. Ab der Nennstromstärke erwärmt sich der Draht allmählich über seinen Schmelzpunkt und reißt bei einem Kurzschluss sehr schnell. Ist die Stromstärke nur geringfügig erhöht, führt der Quarzsand die Wärme noch einige Zeit ab. Der Sand löscht auch den Lichtbogen, der sich an der Bruchstelle bildet. Wenn der Schmelzleiter reißt, fällt ein Plättchen aus der Sicherung heraus und zeigt so an, dass diese Sicherung ausgewechselt werden muss.



WUSSTEN SIE SCHON?

Bereits **Thomas A. Edison** (1847–1931) setzte 1880 vor jeder seiner wertvollen Glühlampen eine Schmelzsicherung, um sie vor zu hohen Strömen zu schützen.

Ein **Herzinfarkt** kann schon durch 0,1 Ampere ausgelöst werden, wenn sie durch den ganzen Körper fließen. Bereits bei 0,01 Ampere kontrahieren Muskeln derart, dass das Opfer ein stromführendes Teil nicht mehr loslassen kann. Ein Helfer sollte dann den Stromkreis unterbrechen oder die Person wegschlagen, sie aber keinesfalls festhalten, da er dann selbst an ihr »festkleben« könnte.

Sicherungen haben nicht die Aufgabe, den Menschen, sondern das Leitungsnetz zu schützen. Tödliche Unfälle kann ein so genannter **Fehlerstromschutzschalter (FI-Schalter)** verhindern, allerdings nur dann, wenn eine Person einen Leiter berührt und Ladung durch den Körper zur Erde abfließt. Dieser Schalter vergleicht nämlich die Strommenge, die in einen Stromkreis hineinfließt, mit der, die ihn wieder verlässt. Stimmen die Werte nicht überein, trennt er in Sekundenbruchteilen alle Stromkreise eines Stromverteilers vom Netz. Berührt man aber mit beiden Händen unterschiedliche Adern einer Leitung, fließt der Strom durch den Körper ohne abzuzweigen und der FI-Schalter bleibt untätig.

Dank strengerer **Bestimmungen** für elektrische Geräte ist die Zahl der tödlichen Elektrounfälle von 1969 bis 1999 von 300 auf nur 88 gesunken.

Bei einem Kurzschluss steigt der Strom sehr schnell an. Übersteigt der Wert das Dreifache der Nennstromstärke, drückt ein Elektromagnet innerhalb von hundert Millisekunden einen Schlaganker so stark nach unten, dass ein beweglicher Kontakt gelöst wird und so den Stromkreis unterbricht. Dabei klappt ein Schaltgriff in die »Aus-Stellung« (hier dargestellt). Liegt die Stromstärke für längere Zeit über dem Nennwert, aber noch unter der Kurzschluss-Schwelle, erwärmt sich ein Bimetallstreifen und biegt sich nach oben. Dabei drückt er gegen einen Stift des Entklinkungsschiebers und bewegt damit den Schaltgriff nach unten. Wenn der Kontakt unterbrochen wird, bildet sich durch Ionisation der Luft ein Lichtbogen zwischen dem beweglichen und dem festen Schaltstück, also eine leitende Verbindung. Er wird aber in die Lichtbogenlöschkammer geleitet und dort von gegeneinander isolierten Metallplättchen in schwächere Lichtbögen zerlegt, bis er schließlich zusammenbricht.

Die Kunst, sich nicht fressen zu lassen

Wer so klein wie die schwebenden Algen des Phytoplanktons ist, muss sich vieler Angriffe erwehren. Jede Maßnahme einer Partei provoziert aber einen Gegenzug der anderen Partei. Diesem biologischen Wettrüsten spüren Wissenschaftler nach – unter dem Mikroskop.

Von Stefanie Kühn

Pflanzen haben's schwer. Fest verwurzelt an Land können sie nicht fliehen, weder vor Fressfeinden oder Parasiten noch vor Sturm oder Feuer. Hinzu kommt die lokale Konkurrenz um Licht und Nährstoffe. Schiere Größe und Widerstandsfähigkeit, gepaart mit Langlebigkeit, mag hier von Vorteil sein. Man denke nur an das Erfolgsmodell Bäume.

Im freien Wasser der Seen und Meere sieht es ganz anders aus. Hier dominieren im hellen oberen Bereich relativ kleine schwebende Algen: das Phytoplankton. Durch Wind und Temperaturschwankungen ist ihr Lebensmilieu ständig in Bewegung, treibt sie unablässig umher. Unter günstigen Bedingungen vermehren sich Algen stark. Im Meer beispielsweise können alljährlich verschiedene Arten nacheinander plötzlich so massenhaft auftreten, dass wir Wissenschaftler von einer Algenblüte sprechen. Aber binnen weniger Wochen »welkt« und verschwindet jede Algenblüte stets wieder von selbst. Keiner dieser winzigen Meerespflanzen ist es im Laufe der Evolution offensichtlich gelungen, in einem »Ressourcen-Raum« im freien Wasser dauerhaft über Konkurrenten zu dominieren. Selbst bei »Massenblühern« gehen übers Jahr gesehen mehr oder weniger genau so viele Plankton-Algen unter, wie neue hinzukommen. Übertragen auf Landökosysteme wäre das so, als gebe es keine Wälder mit hohen alten Bäumen, sondern letztendlich nur abgegraste Weiden.

Sich möglichst teuer verkaufen

Auffällig am Phytoplankton ist seine Vielfalt. Die darunter zusammengefassten Organismen verteilen sich auf mindestens zehn Stämme, die entwicklungsgeschichtlich weiter voneinander entfernt sind als Landpflanzen und Tiere. Dies erklärt aber noch nicht, was Wissenschaftler seit jeher beim Blick durchs Mikroskop fasziniert: die Vielgestaltigkeit der Organismen im Phytoplankton.

Bestünde nur Konkurrenz um Nährstoffe und Licht, hätten sich im Wasser eigentlich im Laufe der Evolution vor allem kleine kugelige Zellen durchsetzen müssen. Denn die kleinen besitzen im Verhältnis zu ihrem Volumen die größte Oberfläche – und damit einen anteilig größeren Bereich, über den sie stark verdünnte Nährstoffe, etwa Stickstoff, aufnehmen können.

Tatsächlich haben einschlägige Untersuchungen der letzten Jahre ergeben, dass winzigste Cyanobakterien, früher Blaualgen genannt, mit Abstand die zahlenmäßig stärkste Fraktion im marinen Phytoplankton stellen. Bei einem Zelldurchmesser von nur einem tausendstel Millimeter ist ihr Mengenanteil am Futter für andere Lebewesen jedoch verhältnismäßig gering. Nur in den nährstoffarmen »Wüsten« im Bereich der subtropischen Meereswirbel bilden sie eine bedeutende Nahrungsgrundlage. In allen anderen Gebieten hingegen liefern die deutlich größeren und fast nie kugelig runden Mikroalgen den Löwenanteil der nachwachsenden »grünen« Biomasse. Der Erfolg von relativ großen, zudem ganz verschiedenartig gestalteten Phyto-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.





Einbrecheralarm der magischen Art: Manche Plankton-Organismen leuchten bläulich oder grünlich, wenn es turbulent wird. Wenn etwa Kleinkrebse (unten) den ballonartigen Einzeller *Noctiluca* (oben) einstrudeln wollen, lockt sein Licht Fische an, die Kleinkrebse vertilgen.

plankton-Zellen kann also nicht durch die Konkurrenz um Ressourcen erklärt werden. Doch was ist es dann?

Erst in neuerer Zeit richtete sich das Augenmerk der Forscher verstärkt auf einen vernachlässigten Aspekt: den potenziellen Feinddruck. Wie die Pflanzen an Land bildet das Phytoplankton in Meeren und Seen die Grundlage der Nahrungsnetze. Kleine Räuber – sie können sogar deutlich kleiner als ihre Opfer sein – erbeuten eher einzelne Algenzellen, während größere ihre Opfer gleich en masse abfischen: etwa mit Fresstrudeln vor der Mundöffnung, Schleimnetzen oder wirkungsvollen siebartigen Filtern. Gefangenes wird je nachdem angestochen, zerquetscht oder als Ganzes aufgenommen.

Neben den großen und kleinen Räubern lauern allerdings noch weitere Gefahren auf die Plankton-Organismen. So ist erst seit rund 15 Jahren bekannt, dass Mikroalgen auch von Viren befallen werden. Noch verblüffender war die Erkenntnis, dass Viren im Meerwasser sogar zahlreicher vorkommen als Bakterien. Ihre Auswirkungen auf das Nahrungsnetz sind erst wenig erforscht, doch steht inzwischen fest, dass ein Virenbefall eine Algengemeinschaft stark dezimieren kann.

Zum Schutz vor Krankheitserregern oder Fressfeinden haben Mikroalgen ganz verschiedenartige Verteidigungsstrategien entwickelt, getreu dem Motto, sich so teuer wie möglich zu verkaufen. Grundsätzlich gilt hier nämlich: Je mehr Zeit und Energie ein Angreifer aufwenden muss, desto eher wird er Opfer dieser Art künftig in Ruhe lassen. Jeder Zug einer Partei wird freilich im Laufe der Evolution wieder mit einem Gegenzug der anderen Partei beantwortet – ein weites Feld zugleich für neue wissenschaftliche Entdeckungen. Und hier scheint auch der Schlüssel zum Formenreichtum des Phytoplanktons zu liegen.

Schaumschlägerei

Beginnen wir mit der mikroskopisch kleinen Alge *Phaeocystis*. Sie wird auch Schaumalge genannt, da sie insbesondere nach Stürmen oft an den Meeresstränden unliebsame, übel riechende Schaumberge bildet. Zellen dieser Art können einzeln vorkommen; sie tragen dann Geißeln und schwimmen mit diesem Antrieb umher. Überwiegend ziehen sie es jedoch vor, in einer engen Gemeinschaft mit ihresgleichen zu leben und dafür ihre Beweglichkeit aufzugeben. Bis zu einige tausend Individuen umfasst eine solche Kolonie, die von einer Gallerthülle umgeben ist und manchmal mehrere Millimeter groß wird. Das Leben in dieser Gemeinschaft bietet viele Vorteile, denn die Einzelzellen werden nachweislich sehr viel häufiger gefressen. Mehr noch: Nur sie werden interessanterweise auch von den massenhaft vorkommenden Viren befallen. Wie vermag aber bloße Gallerte ▷

▷ davor zu schützen? Erst kürzlich konnte Christian Hamm vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven (AWI) zeigen, dass die Kolonien zusätzlich von einer hauchdünnen, aber reißfesten Haut umschlossen sind. Er stach mit einer Pipette in die Kolonie hinein und saugte sämtliche Zellen und Gallerte auf. Zurück blieb die bis dahin unbekannte Zusatzhülle.

Leben in der Camembert-Schachtel

Victor Smetacek, ebenfalls am AWI, und mir an der Universität Bremen fiel auf, dass die Algenzellen in diesem gewissermaßen mit Wasser gefüllten Sack nie direkt unter der Haut sitzen, wo sie am besten Nährstoffe von außen aufnehmen könnten, sondern immer ein kleines Stück tiefer (Foto links unten). Wir vermuten, sie halten sich dadurch Viren buchstäblich vom Leib. Diese Erreger brauchen, um eine Zelle zu infizieren, unmittelbaren Kontakt mit ihr.

Viren sind auch eine Gefahr für eine kleine, diesmal kugelige Süßwasser-Grünalge der Gattung *Chlorella*. Dieser Winzling hat einen anderen Ausweg gefunden, um sich vor einer Infektion zu schützen: Er lebt im Körper des grünen Pantoffeltierchens, eines Einzellers (Foto unten). Für die Alge ist es vorteilhafter, sich gewissermaßen zusätzlich mit einer fremden Haut zu bedecken, auch wenn sie ohne Pantoffeltierchen durchaus lebensfähig ist. Der Wirt profitiert ebenfalls von dieser engen Symbiose. Die Alge liefert ihm nämlich Kohlenhydrate und – ganz wichtig – Vitamine.

Pflanzliche Zellen besitzen auch so etwas wie eine eigene »Außenhaut«: ihre Zellwand. Eine gute Sicherheitsvorkehrung kann es daher sein, sich eine möglichst dicke Zellwand zuzulegen. Auch hierfür finden wir im Plankton zahlreiche Beispiele. Gepanzert sind beispielsweise die Kieselalgen, in der Fachsprache als Diatomeen bezeichnet. Im Phytoplankton stellen sie die bedeutendste Gruppe an der Basis des aquatischen Nahrungsnetzes. Ihre Zellwand besteht aus zwei ineinander geschachtelten Schalen, ähnlich wie bei einer altmodischen Camembert-Schachtel. Das Besondere an dieser Zellwand: In sie ist Silikat eingelagert, also das gleiche Rohmaterial, aus dem Glas besteht. Die Kieselschalen der Diatomeen zeigen vielfältige, geradezu kunstvoll anmutende Formen und Strukturen.

Dennoch kann ein solcher Panzer oft nicht verhindern, dass die Algen von größeren Tieren des Planktons, wie etwa Krebschen des Zooplanktons, verschluckt werden. Zwar nicht sie selbst, aber ihre besonders dickwandigen, teilweise sogar bestachelten Dauersporen können die Passage durch den Darm des Tieres, vergleichbar mit einem Kirschkern, durchaus unbeschadet überstehen. Interessanterweise hat noch nie ein Forscher beobachtet, dass Kieselalgen von Viren befallen werden – und das, obwohl die potenziellen Opfer in den Ozeanen zeitweise massenhaft vorkommen. Wir können uns sehr gut vorstellen, dass der Kieselpanzer und die aufgelagerte organische Schicht für Viren eine undurchdringliche Barriere darstellen.

Man mag es kaum glauben, aber andere Winzlinge unterlaufen den Virenschutz. So haben wir in der Nordsee nur wenige tausendstel Millimeter kleine Geißeltierchen neu entdeckt, die sich darauf spezialisiert haben, Kieselalgen zu befallen und auf die verschiedensten Weisen zu vertilgen. Vom Verhalten her sind sie irgendwo zwischen Schmarotzern (Parasiten) und Räubern einzuordnen. Daher haben wir sie Parasitoide – Parasitenähnliche – genannt. Dieser Begriff kommt eigentlich aus der Welt der Insekten und besagt, dass eine Art während ihrer Entwicklung eine andere tötet. So legen beispielsweise Schlupfwespen ihre Eier in die Larven anderer Insekten, die dann von den schlüpfenden Maden allmählich aufgefressen werden.

Vor vollen Töpfen verhungern

Eine Schwachstelle im Panzer der Kieselalgen besteht offensichtlich dort, wo die beiden Schalen einander überlappen. Einige Parasitoide quetschen sich durch den schmalen Spalt. Mit einem Scheinfüßchen zwacken sie dann kleine Portionen des Diatomeen-Zellkörpers ab und verleiben sie sich ein. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis alles aufgezehrt ist. Andere Geißeltierchen bleiben außen auf der Schale sitzen und treiben nur ihr Scheinfüßchen durch den Spalt oder eine Pore der Schale bis in die Zelle hinein. Das Ergebnis ist jedoch das gleiche (siehe Kasten auf der rechte Seite).

Die Kieselalgen sind aber dieser Kategorie Miniräubern wiederum nicht generell hilflos ausgeliefert. Auffällig ist nämlich, dass die meisten ihrer Parasitoide sich scheinbar sehr wählerisch verhalten und oft sogar nur Arten innerhalb einer einzigen Gattung befallen. Hin und wieder konnten wir beobachten, wie suchende Geißeltierchen so von einer Kieselalgenart angezogen wurden, dass sie diese umschwärmten wie Motten das Licht. Einige der Angelockten schienen sich aber aus unbekannten Gründen gar nicht erst auf der Kieselschale niederzulassen. Andere taten dies zwar, doch es gelang ihnen nicht, in die Zelle einzudringen. Es sieht ganz so aus, als hätten die vielgestaltig und kompliziert aufgebauten Kiesel-

Grünalgen

◀ **Schutz durch Größe verschaffen sich kleine Grünalgen der Gattung *Chlorella*, indem sie sich in Pantoffeltierchen einmieten. Innerhalb ihres Wirtes sind die Algen auch vor Viren sicher.**



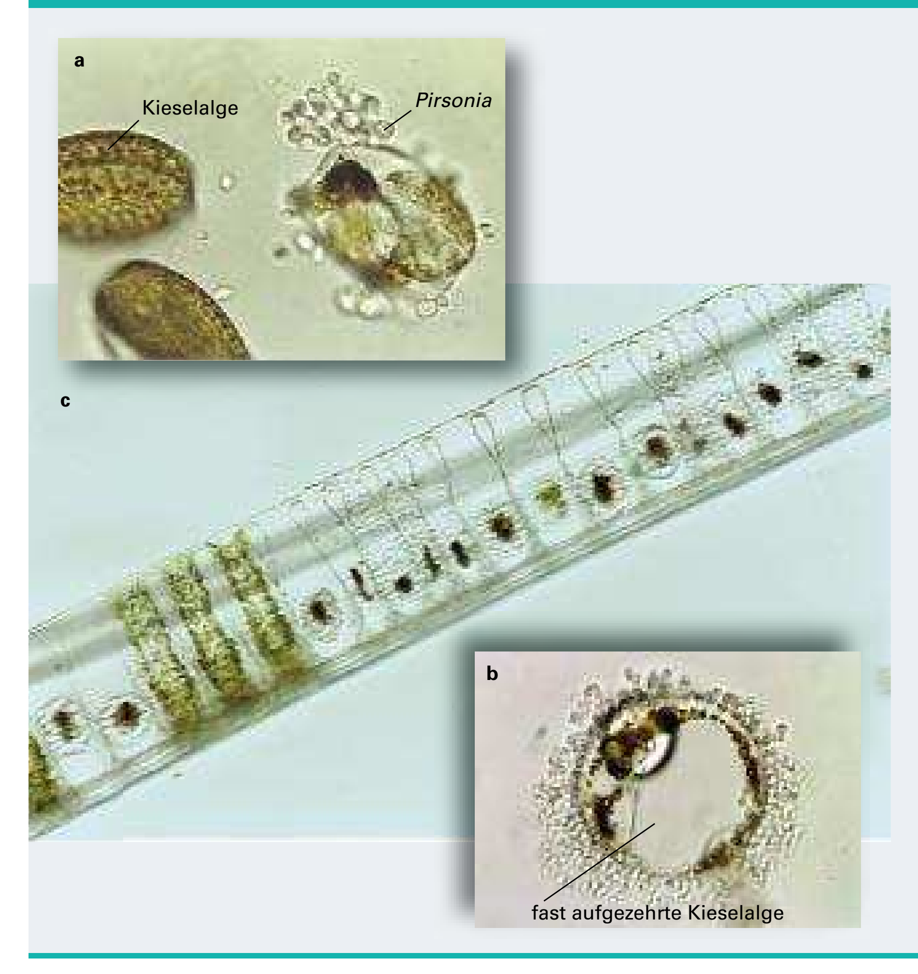
ALLE FOTOS DIESER DOPPELSEITE: STEFANIE KÜHN

▲ **Als Großkolonien sind die Zellen der Schaumalge *Phaeocystis* ein sperriger Brocken. Eine dünne gemeinsame »Haut« mit einer Sicherheitszone hält zudem Viren auf Abstand.**



▲ **Die Kieselalge *Berkeleya* lebt mit ihresgleichen in langen, selbst gebildeten Schläuchen. Jede Zelle steckt zudem in einem eigenen zweischaligen Kieselpanzer.**

Wenn die Kleinen die Großen fressen





Verschiedene parasitenartige Miniräuber können Kieselalgen heimsuchen. Winzige Geißeltierchen der Gattung *Pirsonia* heften sich außen an, treiben ein Scheinfüßchen durch Spalten oder Poren der Kieselschale und löffeln den Zellinhalt aus (a). Sie vermehren sich dabei prächtig wie auf der Kieselalge (b). Andere Geißeltierchen quetschen sich sogar durch die Schale. So sind hier bei einer Ketten bildenden Kieselalge (c) alle Zellen bis auf drei befallen. Eine andere Kieselalge (d) ist in ihrer Schale durch den Aderlass zweier Miniräuber (pilzförmig) auf die Hälfte geschrumpft. *Pirsonia* hat bei ihr aber keine Chance.

panzer die Parasitoide gezwungen, sich als Einbrecher auf einen bestimmten »Tresortyp« festzulegen, sei ein anderer auch noch so verlockend.

Unsere Vermutung wird gestützt durch das Verhalten einer marinen Amöbe, die sich ebenfalls auf das Fressen von bestimmten Kieselalgen spezialisiert hat. Sie umfließt nicht wie andere Wurzelfüßer ihre Beute, um sie dann in ein Nahrungsbläschen einzuschließen. Stattdessen treibt sie ebenfalls ein Scheinfüßchen zwischen den beiden Schalenhälften nach innen und zwickt so lange Häppchen vom Zellplasma ab, bis nichts mehr übrig ist. Allerdings gibt es auch Kieselalgen, in die diese Amöbe nicht hineinlangen kann. Wir konnten im Experiment sehen, wie sie auf deren Schalen, quasi vor vollen Töpfen, verhungerte. War der Kieselpanzer jedoch defekt, hatte die Amöbe leichtes Spiel.

Normalerweise liegt der von Parasitoiden begehrte Zellkörper so dicht an der Schale, dass unter dem Mikroskop kein Zwischenraum zu erkennen ist. Eine geschickte Möglichkeit, sich der hungrigen Langfinger zu erwehren, wäre es demnach, den Zellkörper einfach von der Schale zurückzuziehen, außer Reichweite. Genau das haben wir bei einer marinen Kieselalge mit dem klangvollen Namen *Guinardia flaccida* beobachtet, als ein Geißeltierchen der Gattung *Pirsonia* sein Scheinfüßchen durch den Schalenspalt presste.

Zur Untermiete in der Burg

Einen wieder anderen Trick verwendet eine Süßwasser-Zieralge: Sie verhindert mit einem Pfropfen aus Zellulose, dass ein schmarotzender Pilz mit seinem so genannte Stachel in sie eindringen kann. Sie schiebt gewissermaßen einen Riegel vor und der Pilz verhungert.

Ähnlich wie die Süßwasseralge *Chlorella* sicheren Unterschlupf im grünen Pantoffeltierchen gefunden hat, leben auch manche Kieselalgen gut geschützt zur Untermiete. Einen besonders sicheren Hort bieten wohl Foraminiferen, auch beschalte Wurzelfüßer genannt. Diese nur im Meer vorkommenden Einzeller sind mit den Amöben verwandt, besitzen aber ein Kalkgehäuse, in das sie ihre zahllosen Scheinfüßchen bei Gefahr zurückziehen können. Mit bis zu ein paar Millimetern Durchmesser sind die Foraminiferen viel größer als die beherbergten Kieselalgen. Die Untermieter sitzen in den Scheinfüßchen, betreiben hier Photosynthese und wenn es gefährlich wird, werden sie mit in das Kalkgehäuse zurückbefördert.

Bei einer derart sicheren Unterkunft verwundert es kaum, dass diese Kieselalgen einfach auf ihren Panzer verzichten! Werden sie jedoch von Wissenschaftlern aus ihrer gemieteten Behausung herausgeholt und gewissermaßen gezwungen, selbst für sich zu sorgen, bilden sie ihre schachtelartige Kieselschale wieder aus. Auch dies weist darauf hin, dass die eigene Schale als Schutz gegen Viren oder sonstige Feinde gedacht ist.

Doch auch bei Kieselalgen gilt: Doppelt genäht hält besser. Auf dem Boden des Wattenmeeres, also nicht im Plank- ▷

▷ ton, gibt es eine kriechende Diatomee in eigener Schale, die mit zahlreichen Artgenossen in selbst geschaffenen Schläuchen recht sicher vor Fressfeinden lebt (rechtes unteres Foto Seite 40).

Größe ist in der Tierwelt eine nicht zu unterschätzende Sicherheitsvorkehrung gegen Übergriffe. So haben gewaltige Säugetiere wie Wale oder Elefanten kaum noch natürliche Fressfeinde, die ihnen gefährlich werden können. Ein vergleichbarer Riese unter den Kieselalgen ist *Coscinodiscus wailesii*, mit einem Zell-Durchmesser von bis zu einem halben Millimeter. Die Kleinkrebse der Nordsee können derartige Brocken höchstens anknabbern, aber auf keinen Fall mehr verschlucken. Dafür befällt aber ein »Algenpilz« speziell diesen Riesen.

Was ist aber, wenn man selbst ein Zwerg ist? Vor allem im Meer haben viele kleine Kieselalgen einen Ausweg gefunden: Sie bilden einfach mit ihren Töchtern, Enkeln, Urenkeln und deren Kindeskindern sehr lange Ketten, die für den Fressapparat von Kleinkrebsen zu sperrig sind. Koloniebildung in dieser und anderer Form ist auch im Süßwasser eine beliebte Lösung. Die Grünalge »Zackenrädchen« aus der Gattung *Pediastrum* macht ihrem Namen alle Ehre; denn sie bildet scheibenförmige Kolonien, deren Randzellen vielfach noch mit zwei Stacheln bestückt sind.

Einigeln und Panzern

Verblüffend ist die Reaktion einer sternförmigen Zieralge auf die Anwesenheit von Kleinkrebsen: Sie bildet außen Klebepölsterchen, ihre Zellen verklumpen und schon wird der Happen für die filtrierenden Räuber zu groß (Foto c im Kasten unten).

Die im Pflanzen- und Tierreich verbreiteten Stacheln sind ein nicht zu verachtender Schutz gegen Fressfeinde. Auch unter Kieselalgen gibt es Vertreter mit ausgesprochen langen »Borsten«. Allerdings ist erst mit dem Elektronenmikroskop zu erkennen, dass diese Auswüchse sogar noch Widerhaken tragen (Schwarz-Weiß-Aufnahme Seite 43 unten) Häufig sind gerade die lebenswichtigen Dauerstadien von Kieselalgen und Dinoflagellaten mit bizarren Ausstülpungen besetzt.

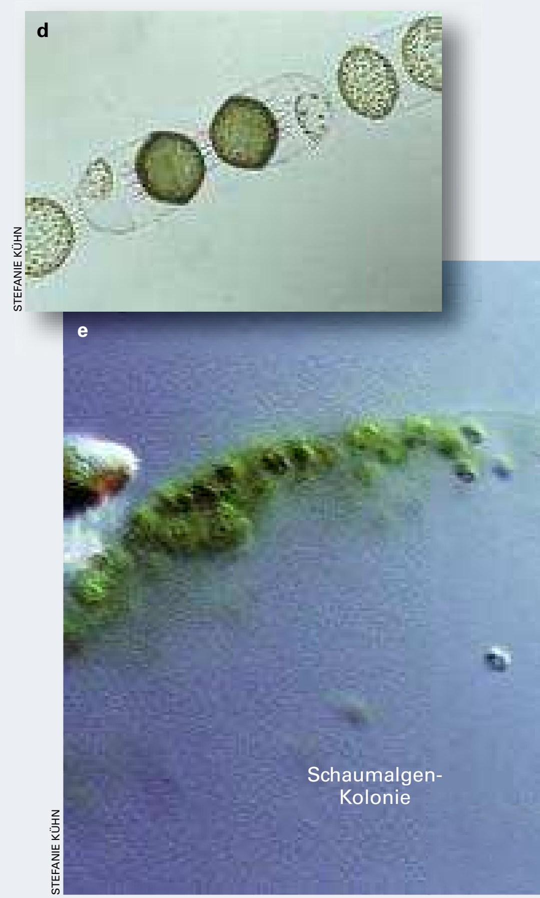
Dinoflagellaten bilden eine wichtige und dabei höchst interessante Gruppe in der Plankton-Gemeinschaft. Die meisten dieser Einzeller schwimmen mit ihren beiden Geißeln charakteristisch trudelnd durch das Wasser. Viele Dinoflagellaten haben ihre Zellwand mit eingelagerten Zelluloseplatten dermaßen verstärkt, dass sie regelrecht »gepanzert« sind. Daher rührt ihr alter Name Panzergeißler. Die Anzahl, Form und Struktur der Platten ist so charakteristisch, dass Wissenschaftler sie zur Artbestimmung nutzen. Doch selbst die so genannten »nackten« Arten tragen noch dünne Zelluloseplatten in ihrer Zellwand.

Ein Teil der Dinoflagellaten verhält sich pflanzlich, betreibt also Photosynthese; ein anderer hingegen ernährt sich wie Tiere von anderen Organismen. Viele machen aber beides. Wir begegnen den »Dinos« daher als Beute wie als Räubern.

Stacheln, Spitzen, Klebepolster



Lange fädige Grünalgen (a) sind für den Wasserfloh (b) nur schwer zu fressen, die kleine sternförmige Zieralge (c) aber eigentlich leicht. Doch die bildet in Gegenwart der Räuber Klebepölsterchen (blau) aus und verbäckt zu unhandlichen Brocken. Auch der Wasserfloh rüstet bei Feinddruck auf, erkennbar an längeren Spitzen.



Vor Letzteren schützen wiederum Stacheln. So beobachtete der Meeresbiologe Gerhard Drebes an der Wattenmeerstation List auf Sylt, dass die Stacheln auf den Eiern eines Kleinkrebses lang genug sind, um einen räuberischen Dinoflagellaten daran zu hindern, mit seinem speziellen Saugrohr bis zur Eioberfläche vorzudringen. Umgekehrt schreckt ein anderer Dinoflagellat wiederum allein mit seiner Körperform Feinde: Wer beißt schon gerne freiwillig in jemanden, der aussieht wie ein dreizackiger Angelhaken?

Ähnlich den Nesselzellen bei Quallen besitzen viele einzellige Kleinstlebewesen der Gewässer nadelartige Organellen, die bei Gefahr abgefeuert werden können. Wir wissen nicht, ob der Kontakt mit diesen Nesseln wirklich unangenehm für größere Räuber ist, eine abschreckende Wirkung haben sie allerdings gewiss.

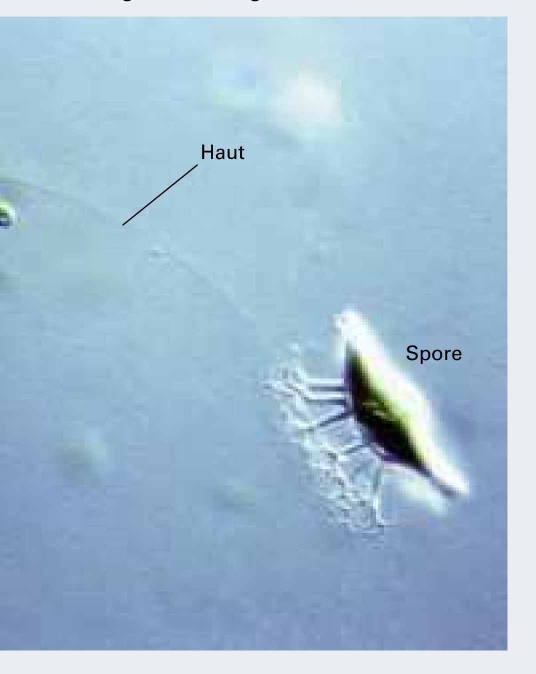
Kein Schutz wirkt aber absolut. Erst in den letzten Jahrzehnten haben Meeresbiologen herausgefunden, wie vor allem relativ kleine räuberische Dinoflagellaten erfolgreich die Verteidigungsmechanismen ihrer Opfer überwinden. Ein Beispiel ist der Dinoflagellat *Polykrikos kofoidii*. Zunächst fällt er durch seinen besonderen Körperbau auf, denn bei ihm ist deutlich zu erkennen, dass vier Einzelzellen zu einem einzigen Lebewesen verschmolzen sind. Direkt unter seiner Zellwand sitzen besonders große harpunenähnliche Strukturen – allerdings nicht zur Abwehr, sondern um selbst Beute einzufangen, beispielsweise andere Dinoflagellaten (Foto oben). Die Opfer werden anschließend als Ganzes durch eine Öffnung im Körper aufgenommen und in einer besonderen Blase verdaut.

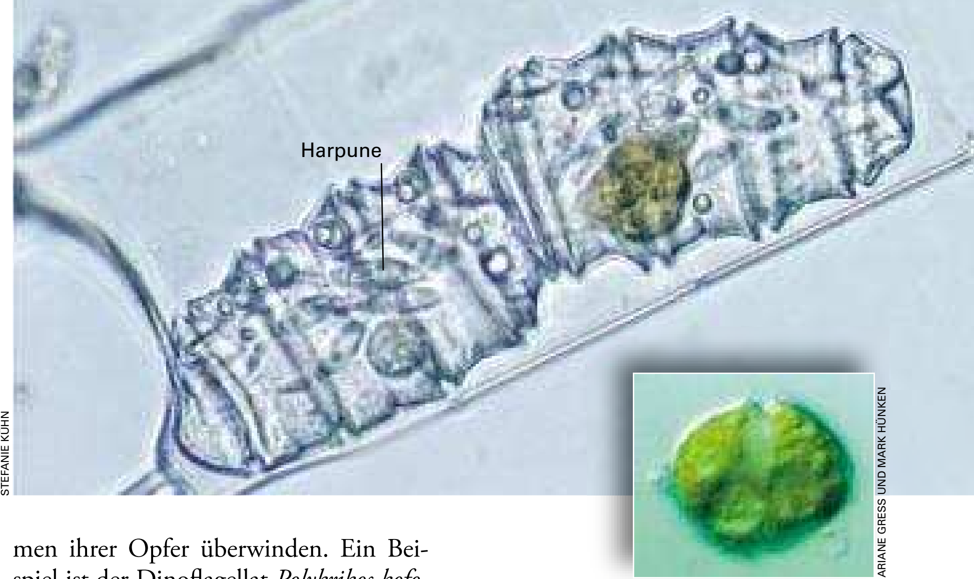
Andere räuberische Dinoflagellaten besitzen ein großes mantelartiges Scheinfüßchen, mit dem sie sogar die langen Ketten von bestachelten Kieselalgen umhüllen können. Die Algen werden dann mit Hilfe abgegebener Enzyme an Ort und Stelle, außerhalb des Räuberkörpers, verdaut. Nach dem Mahl wird das Scheinfüßchen wieder eingezogen und ist nicht mehr zu sehen. Ebenfalls bei Bedarf ausstülpbar ist bei wieder anderen Arten ein Scheinfüßchen, das eher einem Strohhalm ähnelt. Mit ihm wird das Opfer angestochen und ausgesaugt (Foto b Seite 44). Es gibt sogar einen Dinoflagellaten, der sich darauf spezialisiert hat, mit seinem Scheinfüßchen durch die langen, hohlen Borsten von Kieselalgen bis zu deren Zellinhalt vorzudringen (Foto c Seite 44).

Das Messer des Mörders

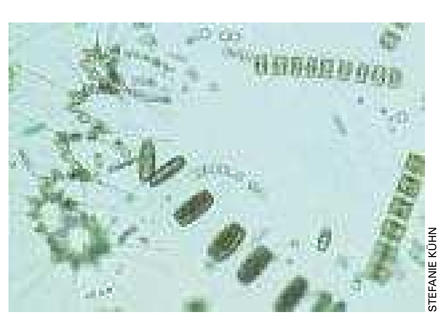
Ein großes Rätsel gaben uns über mehrere Jahre die im Frühjahr auftauchenden Leichen einer bestimmten Kieselalge auf. Bei näherem Hinsehen fanden wir eine Art Schnorchel, der in den toten Opfern steckte. Wir hatten quasi das Messer entdeckt und waren nun auf der Suche nach dem Mörder. Endlich fanden wir ihn: Wieder war es ein Dinoflagellat, der allerdings ein mit Zellulose versteiftes Saugrohr in seine Beute stach (Foto a Seite ▷

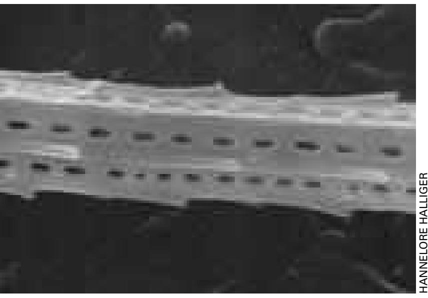
Besonders dicke Kieselwände, teils mit Stacheln, schützen die Dauersporen von Kieselalgen. In der Kieselalgenkette (d) sind zwei solcher Dauersporen fast fertig ausgebildet. Eine bewehrte Spore einer anderen Art ist zufällig auf der Haut einer Schaumalgen-Kolonie gelandet (e).





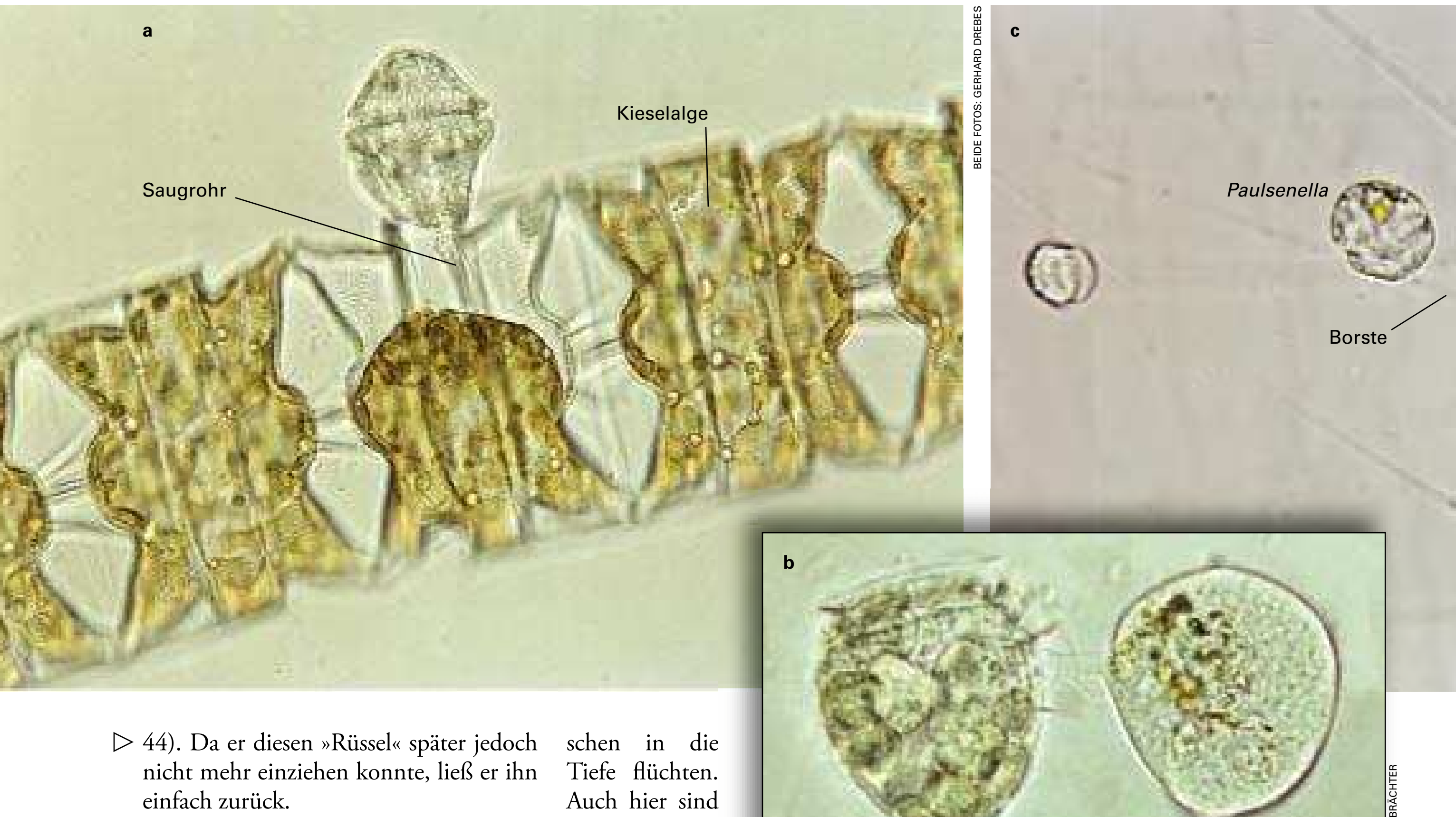
Der Dinoflagellat *Polykrikos* (oben) hat sich hier zufällig in einer leeren Kieselschale geteilt. Er erbeutet mit harpunenähnlichen Strukturen andere Dinoflagellaten. Gerät er aber an den giftigen *Alexandrium tamarense* (kleines Foto), kann das Mahl für ihn tödlich enden.







Stacheln verschiedenster Art, teils noch mit Widerhaken versehen (Detailansicht Mitte), sind ein nicht zu verachtender Schutz und daher bei zahlreichen Plankton-Organismen verbreitet.



▷ 44). Da er diesen »Rüssel« später jedoch nicht mehr einziehen konnte, ließ er ihn einfach zurück.

Für einen Plankton-Organismus kann es recht energieaufwendig sein, allzeit in voller Rüstung gegen Überfälle gewappnet zu sein. Einige Lebewesen im Wasser haben daher im Laufe der Evolution Wege gefunden, nur bei Bedarf – in Gegenwart von Fressfeinden – aufzurüsten. Vielfach geben chemische Botenstoffe das entscheidende Warnsignal. Ein besonders illustratives Beispiel ist der Wasserfloh, der nur im Süßwasser vorkommt. Sein Kopf ist normalerweise eher rund, manchmal aber pickelhaubenähnlich verlängert (Foto b Seite 42).

Wie die Arbeitsgruppe um Winfried Lampert am Max-Planck-Institut für Limnologie in Plön entdeckte, bilden Wasserflöhe diesen Helm erst als Reaktion auf Signalstoffe von Räubern, werden dann aber deutlich seltener gefressen. Weibchen mit einem spitz ausgezogenen Kopf können diesen Vorteil sogar ihrer Nachkommenschaft zugute kommen lassen. Die nächste Generation wird nicht nur bereits behelmt ins Leben entlassen, sondern ist gegenüber den Jungen von Müttern mit rundem Kopf noch zusätzlich im Vorteil, da die eigenen Schutzhauben auf die Signalstoffe hin noch größer werden können.

Ein anderes Team in Plön stellte fest, dass Wasserflöhe in Gegenwart von Fischen in die Tiefe flüchten. Auch hier sind chemische Botenstoffe im Spiel. Fische haben auf ihrer Haut einen Schleim, der sie für uns so glitschig macht. Substanzen darin werden von Bakterien umgebaut und dann von den Wasserflöhen wahrgenommen. Es ist also ähnlich wie bei uns: Unser Schweiß beginnt erst zu riechen, wenn Bakterien ihn zersetzen.

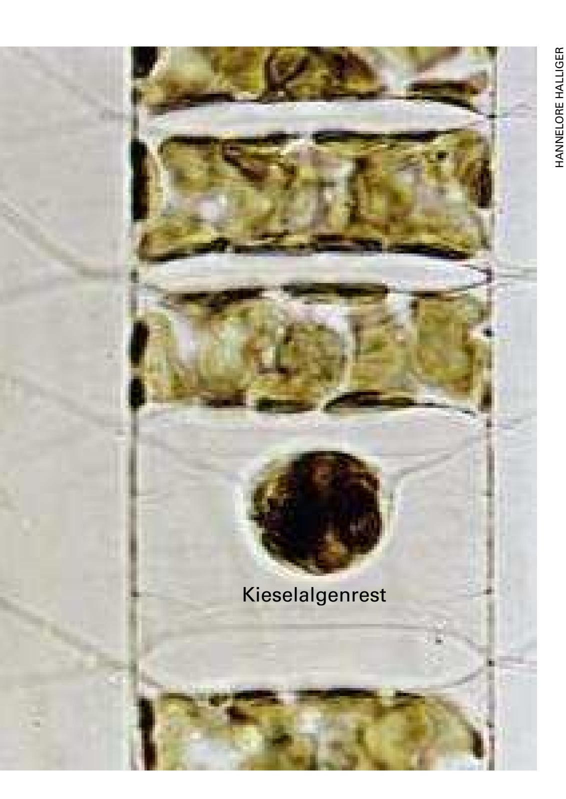
Doch auch der Geruch von Wasserflöhen selbst ist für andere Wasserorganismen ein Warnsignal. Die Krebschen scheiden Harnstoff aus, das Signal für eine bestimmte Grünalge, größere Kolonien zu bilden. Anderen Grünalgen wachsen plötzlich längere Stacheln. Für die Wasserflöhe wird es nun schwer oder gar unmöglich, sie zu fressen.

▲ **Manche räuberische Dinoflagellaten saugen ihre Beute aus. *Gyrodinium undulans* (a) lässt sein steifes Saugrohr zurück, *Dinophysis* (b, links) zieht sein Schlürfinstrument wieder ein, und *Paulsenella* ist eine Art Langfinger, der ausgerechnet über die hohlen »Borsten« von Kieselalgen an deren Zellinhalt gelangt (c).**

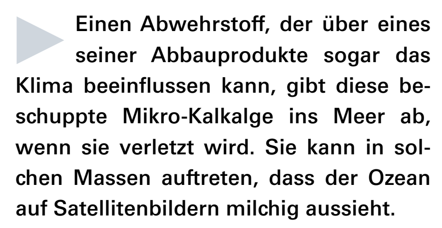
Einbrecheralarm

Eine besonders raffinierte chemische Verteidigungsstrategie wendet eine winzige Planktonalge im Meer an – mit Konsequenzen für unser Klima. Unter dem Elektronenmikroskop sieht dieses nur wenige Tausendstel Millimeter dicke Geschöpf besonders faszinierend aus, denn seine Zellwand ist mit vielen, oftmals sehr bizarren Kalkschüppchen besetzt (Foto rechts). Die Alge kann in solchen Massen auftreten, dass der Ozean an diesen Stellen durch die unzähligen Kalkschüppchen auf Satellitenbildern milchig weiß aussieht. Die Zellen enthalten das an sich unschädliche Molekül DMSP, eine Abkürzung für den zungenbrecherischen Namen Dimethylsulfiopropionat. Werden die Algen von einzelligen Tieren gefressen oder verletzt, entsteht aus DMSP ein chemischer Stoff, der die kleinen Fresser vertreibt.

Ein anderes Abbauprodukt von DMSP ist DMS (Dimethylsulfid). Das Gas tritt aus den Ozeanen in großen Mengen in die Atmosphäre über. Hier dienen seine Moleküle als Kondensationskern für Wassertröpfchen und damit für Wolken. Diese wiederum bewirken, dass Sonnenstrahlung zurück ins All re-



HANNELORE HALLIGER


Einen Abwehrstoff, der über eines seiner Abbauprodukte sogar das Klima beeinflussen kann, gibt diese beschuppte Mikro-Kalkalge ins Meer ab, wenn sie verletzt wird. Sie kann in solchen Massen auftreten, dass der Ozean auf Satellitenbildern milchig aussieht.

flektiert wird und nicht die Erdoberfläche erreicht und erwärmt. Wir wissen heute, dass DMS das Klima beeinflussen kann.

Das ist aber noch nicht alles. Auch etliche andere Algen enthalten DMSP. In der Antarktis verputzt der dort massenhaft vorkommende Krill Unmengen an pflanzlichem Plankton, wobei wiederum DMS entsteht. Vom Geruch angezogen stürzen sich Seevögel nun ihrerseits auf ihr Futter: die Krillkrebschen. Die erste Beute bringt also indirekt ihre Fressfeinde um, in dem sie das übernächste Glied der Nahrungskette anlockt.

Diesen so genannten »Einbrecheralarm« finden wir in abgewandelter, optisch eindrucksvoller Form auch bei den Dinoflagellaten. Sie werden unter anderem von Kleinkrebsen erbeutet. Einige Dinoflagellaten besitzen nun die Fähigkeit, mit Hilfe eines Enzyms im Dunkeln zu glimmen. Vor allem die wie ein Ballon aussehende *Noctiluca* verursacht in warmen Sommernächten das bekannte Meeresleuchten. Dieses Licht zieht – wie bei anderen Dinoflagellaten nachgewiesen – Fische an, die wiederum die Kleinkrebse verschlucken (Fotos Seite 39).

Manche Beute-Algen gehen bis zum äußersten: Mit Giftstoffen verderben sie Räubern den Appetit oder bringen sie gar um. Ein Beispiel: Der aus vier Zellen zusammengesetzte Dinoflagellat *Polykrikos* fängt, wie erwähnt, mit seinen »Harpunen« andere Dinoflagellaten. Gerät er jedoch an einen Vertreter der Gift produzierenden Gattung *Alexandrium*, kann diese Begegnung für ihn tödlich enden.

Zur Welt der Plankton-Organismen, dem größten Lebensraum der Erde, haben wir Forscher erst ein paar Türchen aufgestoßen. Aus den bisherigen Beobachtungen wird jedoch immerhin klar, dass das verborgene biologische Wettrüsten in den Gewässern die enorme Formenvielfalt des Phytoplanktons verständlich machen kann, insbesondere der Kieselalgen, die anders als Dinoflagellaten nicht einmal ihr Heil in der Flucht suchen können. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Stefanie Kühn promovierte am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven. Seit 1998 setzt sie ihre Forschungen mit einem Habilitationsstipendium als wissenschaftliche Assistentin in der Arbeitsgruppe Meeresbotanik an der Universität Bremen fort. Ein Schwerpunkt sind molekularbiologische Studien zur möglichen Koevolution von wirtsspezifischen Phytoplankton-Parasitoiden und ihrer Beute.

A watery arms race. Von Victor Smetacek in: Nature Bd. 411, S. 745, 2001

Rhizamoeba schnepfii sp. nov., a naked amoeba feeding in marine diatoms (North Sea, German Bight). Von Stefanie Kühn. Archiv für Protistenkunde, Bd. 14, S. 277,1996

Freshwater Algae. Their microscopic world explored. Von Hilda Canter-Lund und John W. G. Lund. Biopress Ltd., Bristol, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Verrückte Fluide

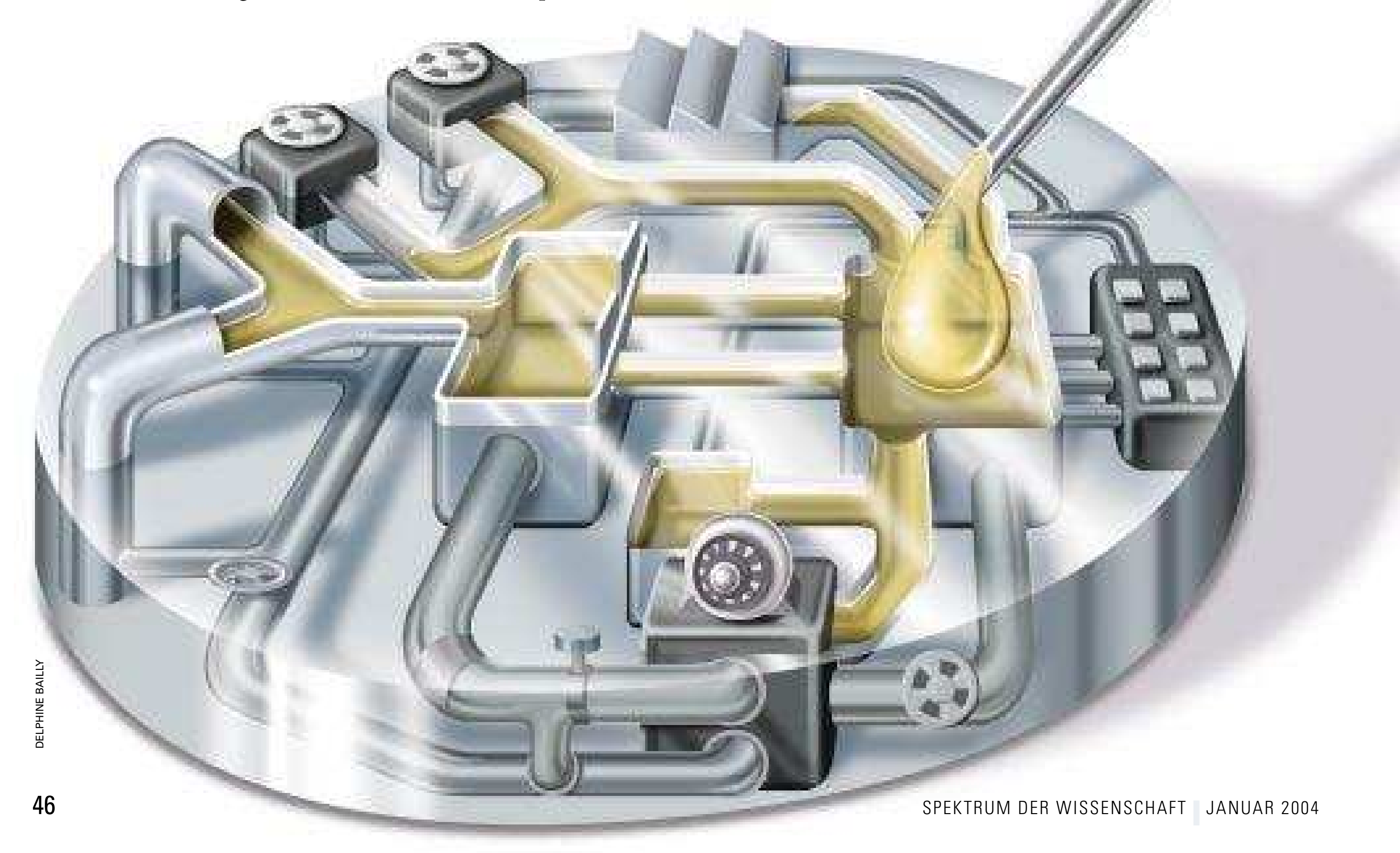
Wenn Kanäle und Ventile in den Mikrokosmos schrumpfen, spielen Gase und Flüssigkeiten verrückt. Wer ganze Chemielabors auf Silizium- oder Kunststoffchips unterbringen will, muss sich deshalb einiges einfallen lassen.

Von Stéphane Colin

Leonardo da Vinci (1452–1519) studierte als einer der Ersten die Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen. Doch erst im 18. Jahrhundert entwickelten die Physiker d'Alembert, Euler und Bernoulli die theoretische Basis der Hydrodynamik, also der physikalisch-mathematischen Beschreibung strömender Medien. Und selbst heute bietet dieses Gebiet Wissenschaftlern und Ingenieuren noch offene Fragen – zumal dann, wenn sie winzige Apparate bauen, deren Ausmaße in der Größenordnung von einem Millimeter liegen. Denn in diesen Dimensionen herrschen andere Gesetze.

Solche Mikromechanischen Systeme (MEMS nach englisch *microelectromechanical systems*) umfassen Sensoren, Antriebe und mikroelektronische Bauteile, die lediglich einige Mikrometer groß sind. Zu den bekanntesten MEMS gehören Druckköpfe von Tintenstrahldruckern, die Farbe in winzigen Tröpfchen zu Papier bringen (Spektrum der Wissenschaft 3/2003, S. 68). Ihre weniger bekannten Verwandten dosieren und mischen flüssige oder gasförmige Substanzen – kurz als Fluide zusammengefasst –, analysieren und synthetisieren chemische Verbindungen. Oft müssen dabei Tropfen mit wenigen Mikrometern Durchmesser verarbeitet oder Strömungen von einigen Pikolitern (10^{-12} Liter) pro Sekunde kontrolliert werden.

Solche Mikrosysteme sind aber selten nur verkleinerte Versionen ihrer makroskopischen Geschwister. Schon die



Komplette Labors, die auf einem Mikrochip Platz finden, sollen beispielsweise an einem einzigen Tropfen Blutplasma verschiedene Analysen durchführen. Mikropumpen und -ventile befördern die Flüssigkeit über winzige Kanäle in Reaktionskammern. Dort wird zum Beispiel die Glukosekonzentration bestimmt. Gegebenenfalls kann der Kontrollprozessor sogar veranlassen, bei zu hohen Werten eine geringe Dosis Insulin zu verabreichen.

DELPHINE BAILLY

Fertigungsverfahren differieren. Dabei entstehen im ersten Schritt Kanäle, die dann verschlossen werden. Je nach Werkstoff wählt man ein anderes Verfahren, diese Leitungen einzubringen. Für Silizium oder Glas eignet sich eine Kombination von Lithografie und Ätzverfahren, ähnlich wie bei elektronischen Chips.

Metallverarbeitung in der Mikrowelt

Die Kanäle können Abmessungen von einigen Mikrometern aufweisen. In Metall erreicht man mit Mikrofräsen oder -bohren Strukturgrößen bis zu hundert Mikrometer, kleinere zum Beispiel mit einer Kombination aus Röntgenlithografie und Galvanik. Kanäle in Kunststoff entstehen in der Regel durch Mikroabformung, das heißt durch Einprägen eines entsprechenden Formwerkzeugs in weiches Polymer. Das metallische Prägewerkzeug seinerseits erfordert die genannten Verfahren der Mikrometallverarbeitung. Derart hergestellte Kanäle haben in der Regel halbrunde, rechteckige oder trapezförmige Querschnitte, während makroskopische Rohre meist kreisförmig sind.

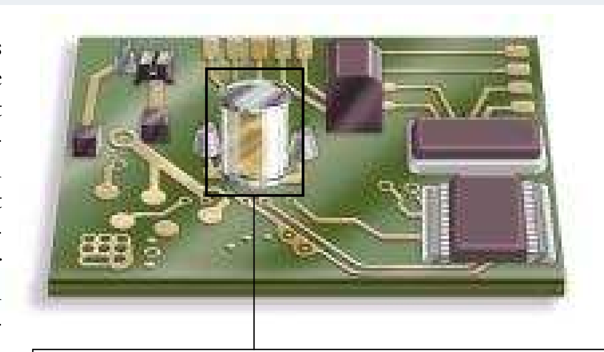
Diese Geometrie beeinflusst das Verhalten der strömenden Medien, mehr aber noch die Effekte der Leitungsoberflächen. Verkleinert man das Volumen eines Fluids von Kubikmeter auf Kubikmikrometer, wächst nämlich das Verhältnis seiner Oberfläche zu seinem Rauminhalt um das Millionenfache. Auf makroskopischer Ebene vernachlässigbare Effekte an Grenzflächen bestimmen plötzlich das Verhalten. Das kann Vorteile haben: Ein Mikro-Wärmetauscher zum Kühlen von Computern (siehe Bild rechts) basiert auf einem Netz von Mikrokanälen in einem Siliziumchip. Flüssigkeit durchströmt die jeweils fünfzig Mikrometer voneinander entfernten Leitungen, jede misst im Querschnitt 20×200 Mikrometer. Die gesamte Anordnung ist gerade mal einen Quadratzentimeter groß, kann aber mehr als tausend Watt ableiten – so viel, wie ein im Haushalt üblicher Heizkörper freisetzt. Mehrere solcher Netze übereinander gelegt erreichen Kühlleistungen von zehn Kilowatt – obwohl dieser Stapel nicht größer als ein Spielwürfel ist, kann er auf Grund seiner im Verhältnis zum Volumen enormen Oberfläche die mittlere Heizleistung eines Einfamilienhauses umsetzen!

Doch häufig stört dieses Verhältnis und erfordert besondere konstruktive Maßnahmen. Zum Beispiel benötigt eine Mikropumpe für Flüssigkeit erheblich höheren Druck, um beim Anlaufen die zunächst noch in ihr enthaltene Luft auszutreiben. Um eine Luftblase aus einer Leitung mit einem Millimeter Durchmesser zu verdrängen, genügen noch einige Millibar. Bei einem Kanälchen von einem Mikrometer Weite dagegen ist das Tausendfache nötig. Denn nach dem Young-Laplace'schen Gesetz wächst der zu überwindende Druckunterschied an der Grenzfläche zwischen zwei Fluiden – hier Luft und Flüssigkeit – mit Abnahme des Krümmungsradius der Fläche, hier der Blase. Je komplizierter die Geometrie ist, desto mehr Luftblasen können die engen Passagen blockieren. Insbesondere Mikroventile sind stark gefährdet, deshalb wurden Varianten entwickelt, die keinerlei bewegliche Teile enthalten, in denen sich Luft fangen könnte.

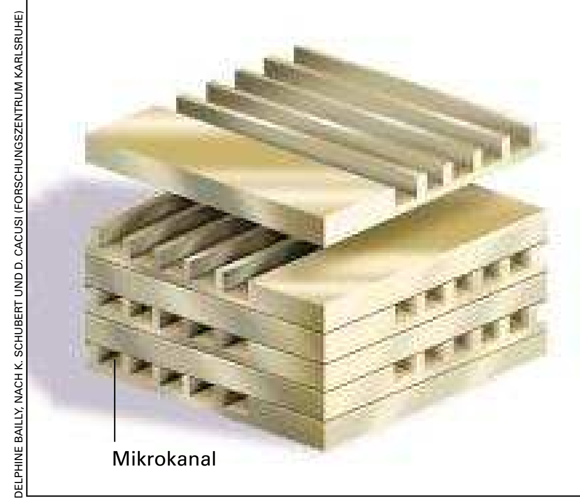
Selbst wenn eine Strömung homogen ist, also nur aus einer gasförmigen oder einer flüssigen Phase besteht, wirft die Miniaturisierung Probleme auf, wobei jeder der beiden Aggregatszustände seine eigenen Tücken birgt. Sehen wir uns zuerst die Gase an. Bei Normalbedingungen von 293 Kelvin Umgebungstemperatur und ein Bar Druck legt ein Luftmolekül in einem makroskopischen System im Mittel 68 Nanometer (10^{-9} Meter) zurück, bevor es auf ein anderes Teilchen stößt. Diese mittlere freie Weglänge schrumpft mit der Gasdichte und der Molekülgröße, denn die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision wächst. Tatsächlich sorgen diese Zusammenstöße dafür, dass zum Beispiel die mit steigender Temperatur zunehmende Bewegungsenergie gleichmäßig in dem Gefäß verteilt wird.

Sprunghafte Strömungen

Wegen solcher Kollisionen ist ein Gas ein »kontinuierliches Medium«, und seine Strömungen lassen sich durch Gleichungen zur Masse- und Energieerhaltung sowie durch die Navier-Stokes-Gleichung zur Impulserhaltung beschreiben. Eine weitere Folge der Kollisionen: In der Nähe einer Gefäßwand nimmt ein klassisches Gas die gleichen Werte für Geschwindigkeit und Temperatur an wie die Wand: Ist diese unbeweglich, gilt dies im Mittel auch für die Gasmole- ▷

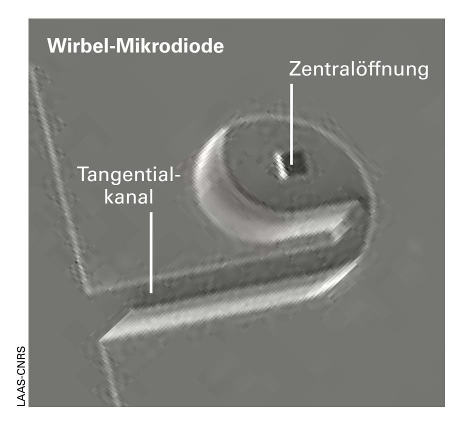


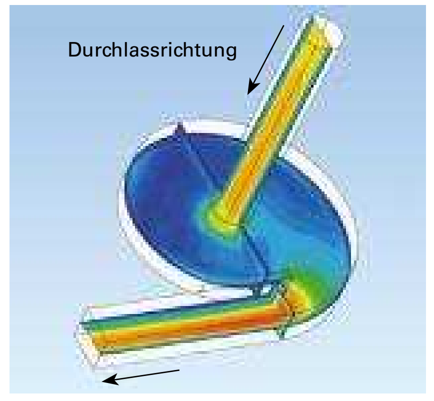


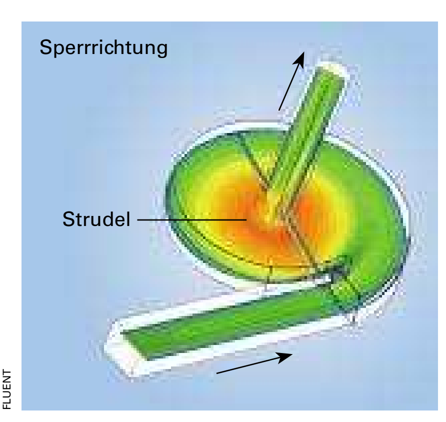


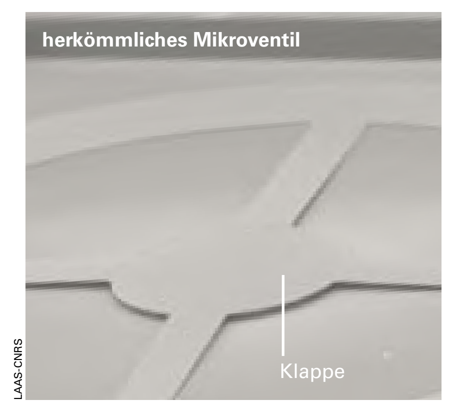
DELPHINE BAILLY, NACH K. SCHUBERT UND D. CACUSI (FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE)

Dieser Kühlkörper passt in einen Fingerhut, vermag aber die Wärme eines Heißwasserboilers abzuleiten. Das verdankt er einem Netz feiner Kanäle mit einem Querschnitt von jeweils 100×200 Mikrometern.









Eine Wirbel-Mikrodiode ist ein Ventil ohne bewegliche mechanische Teile. Deshalb können Gasblasen sie nicht verschließen wie klassische Ventile mit Klappen (Bild unten links). Die Wirbel-Mikrodiode ist in eine Schicht aus Silizium eingearbeitet, die einige hundertstel Millimeter dick ist, und wird mit einer Platte hermetisch abgedeckt. Sie ist asymmetrisch gestaltet, sodass der Durchsatz in Sperrrichtung – also vom Tangentialkanal zur zentralen Öffnung – geringer ist als in der Durchlassrichtung (Farbkodierung des Durchsatzes: von blau über grün nach rot zunehmend).

küle, an Turbinenschaufeln hingegen entspricht ihre durchschnittliche Geschwindigkeit der Rotationsgeschwindigkeit. Ganz andere Bedingungen herrschen in Mikrosystemen. Die Gasdichte ändert sich zwar nicht, doch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Molekül auf eine Wand trifft, steigt.

Schneller, als die Theorie erlaubt

Durch die geringe Anzahl von Kollisionen der Gasmoleküle untereinander ist zudem kein ausreichender Impulsaustausch mehr gegeben – die einzelnen Moleküle behalten unterschiedliche mittlere Geschwindigkeiten und Temperaturen und man kann das Gas nicht mehr als kontinuierliches Medium betrachten. Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur entwickeln sich deshalb von der Wand bis ins Innere der Strömung nicht mehr stetig, sondern sprunghaft. Physiker sprechen von einem Knudsen-Gas, bei dem die mittlere freie Weglänge groß gegenüber der Gefäßabmessung ist. Auch scheint das Gas nicht wie in makroskopischen Kanälen an der Wand zu haften, sondern an ihr entlang zu gleiten. Es fließt deshalb schneller, als es klassische Theorien voraussagen!

Zudem nimmt in Mikrokanälen die Wandtemperatur Einfluss auf die Geschwindigkeit des Gases an der Wand (thermisches Kriechen): Wird eine Leitung auf einer Seite erhitzt, beginnt das Gas darin zur warmen Seite zu strömen, obwohl der Druck auf beiden Seiten gleich ist – ein Phänomen, das man in Rohrsystemen gewöhnlicher Ausmaße und Drücke nicht beobachtet! Doch auf mikroskopischem Maßstab setzen lokale Temperaturunterschiede Moleküle in Bewegung, und diese Bewegungen addieren sich unter geeigneten Bedingungen zu einer Strömung.

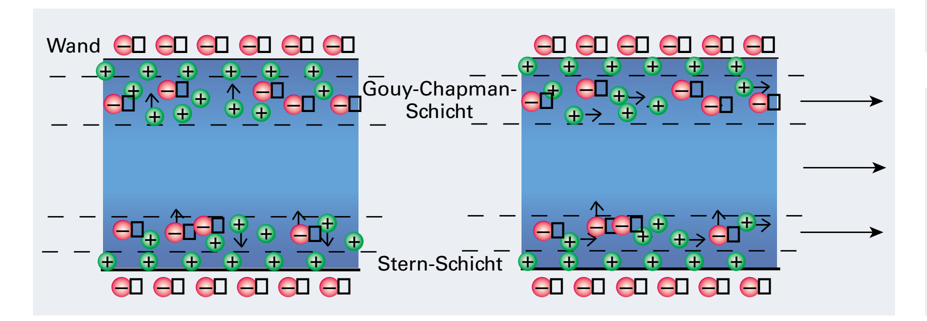
Schrumpft der Gefäßquerschnitt weiter, lässt sich das Gas schließlich nicht mehr durch mittlere Zustandsgrößen wie Druck und Temperatur, sondern nur noch als System aus einzelnen Teilchen beschreiben. Die für derartige Probleme verfügbaren numerischen Verfahren erfordern leider beträchtliche Rechenzeiten. Mikrosysteme mit komplexer Geometrie lassen sich deshalb nur sehr begrenzt durch Computersimulationen optimieren. Zum Glück profitiert die Theorie von Forschungen zur Aerodynamik in großen Höhen, insbesondere zum Wiedereintritt von Raumfahrzeugen in die oberen Atmosphärenschichten. Dort ist die Luftdichte so gering, dass die Moleküle nur wenig mit einander kollidieren – wie in Mikrokanälen.

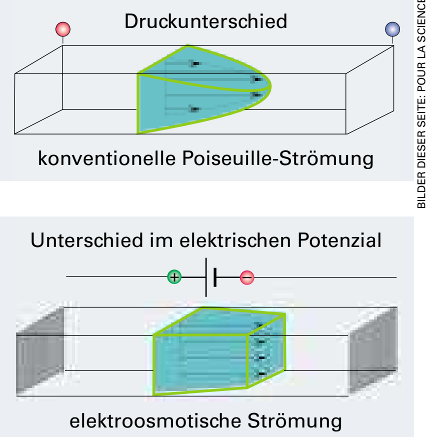
Bei Flüssigkeiten stößt man auf andere Probleme, die weniger gut untersucht sind. Die Moleküle drängen sich in einem flüssigen Medium weit enger als in einem Gas. Ein mit Luft gefüllter Würfel von einem Mikrometer Kantenlänge enthält unter normalen Druck- und Temperaturbedingungen 25 Millionen Moleküle, im selben Volumen Wasser befinden sich dagegen 34 Milliarden Moleküle. Diese stehen deshalb ständig in Wechselwirkung mit anderen – das Konzept der mittleren freien Weglänge ist nicht anwendbar. Aus diesem Grund könnte man erwarten, dass genau aus diesem Grunde die klassischen Modelle bis zu einem kleineren Maßstab gelten. Doch ungewöhnliche Effekte treten bei Flüssigkeiten wie bei Gasen ab einer vergleichbaren Dimension der Kanäle auf. In Kanälen mit einem Mikrometer Weite unterscheiden sich die tatsächlichen Durchsatzraten manchmal beträchtlich von Berechnungen nach der klassischen Theorie Poiseuilles.

Antrieb ohne Druck

Dabei widersprechen sich die Werte manchmal sogar: Einige Forscher messen mehr, andere weniger Durchsatz als klassisch vorhergesagt. In bestimmten Fällen erreichen die Abweichungen fünfzig Prozent – was inakzeptabel ist, vor allem wenn man für biologische Anwendungen sehr genau dosieren muss.

Bei der so genannten Mikroosmose bedient man sich eines elektrischen Feldes, um eine Flüssigkeitsströmung zu erzeugen. Es setzt eine Schicht aus Ionen in Bewegung, die in Flüssigkeiten in Wandnähe spontan entsteht. Diese Schicht zieht dann das gesamte Flüssigkeitsvolumen mit sich.





BILDER DIESER SEITE: POUR LA SCIENCE

Anders als bei klassischen Flüssigkeitsströmungen spielen in Mikrokanälen wahrscheinlich intermolekulare Kräfte vom van-der-Waals-Typ sowie Wechselwirkungen elektrostatischer oder sterischer Art – insbesondere an den Wänden – eine wichtige Rolle. Das Material der Oberfläche – Silizium, Polymer oder Metall – scheint ebenso wichtig zu sein wie ihre Rauigkeit oder wie Modifikationen durch Oxidschichten. Zudem scheinen elektrische Ladungen – auch Polaritäten wie bei Wasser – das Fließverhalten zu beeinflussen.

Solche »elektrokinetischen« Eigenschaften helfen aber auch, überhaupt erst eine Strömung zu erzeugen. In makroskopischen Leitungssystemen treibt gemeinhin ein Druckunterschied die Flüssigkeit voran, doch entsprechende Mikroantriebe sind sowohl in der Herstellung wie auch später in der Anwendung sehr empfindlich. Außerdem wachsen die von der Wand auf das Fluid ausgeübten Kräfte mit abnehmender Kanalweite. Schrumpft diese um neunzig Prozent, muss der Druckunterschied zwischen Ein- und Ausgang auf das Hundertfache steigen, um eine Strömung mit der gleichen mittleren Geschwindigkeit zu erhalten. Das ist technisch oft schwierig zu realisieren.

Eine Reihe neuer Verfahren beruht deshalb auf elektrokinetischen Mechanismen: Kommt zum Beispiel eine Wand aus Silizium mit Wasser in Kontakt, gibt sie Protonen ab und ihr verbleibt negative Ladung (etwa eine pro 16 Quadratnanometer). Positiv geladene Ionen in der Flüssigkeit werden dann zur Wand gezogen, negativ geladene hingegen abgestoßen. Auf Grund der elektrostatischen Kräfte bilden sich in Wandnähe zwei insgesamt zwischen 5 und 200 Nanometer dicke Schichten: Die »Stern-Schicht« besteht aus positiven Ionen und haftet an der Wand, die »Gouy-Chapman-Schicht« enthält ebenfalls überwiegend positive Ionen, die jedoch frei beweglich sind.

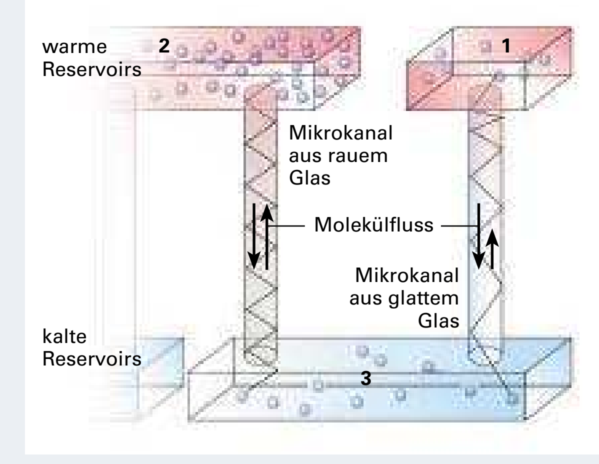
Transpirierende Pumpen

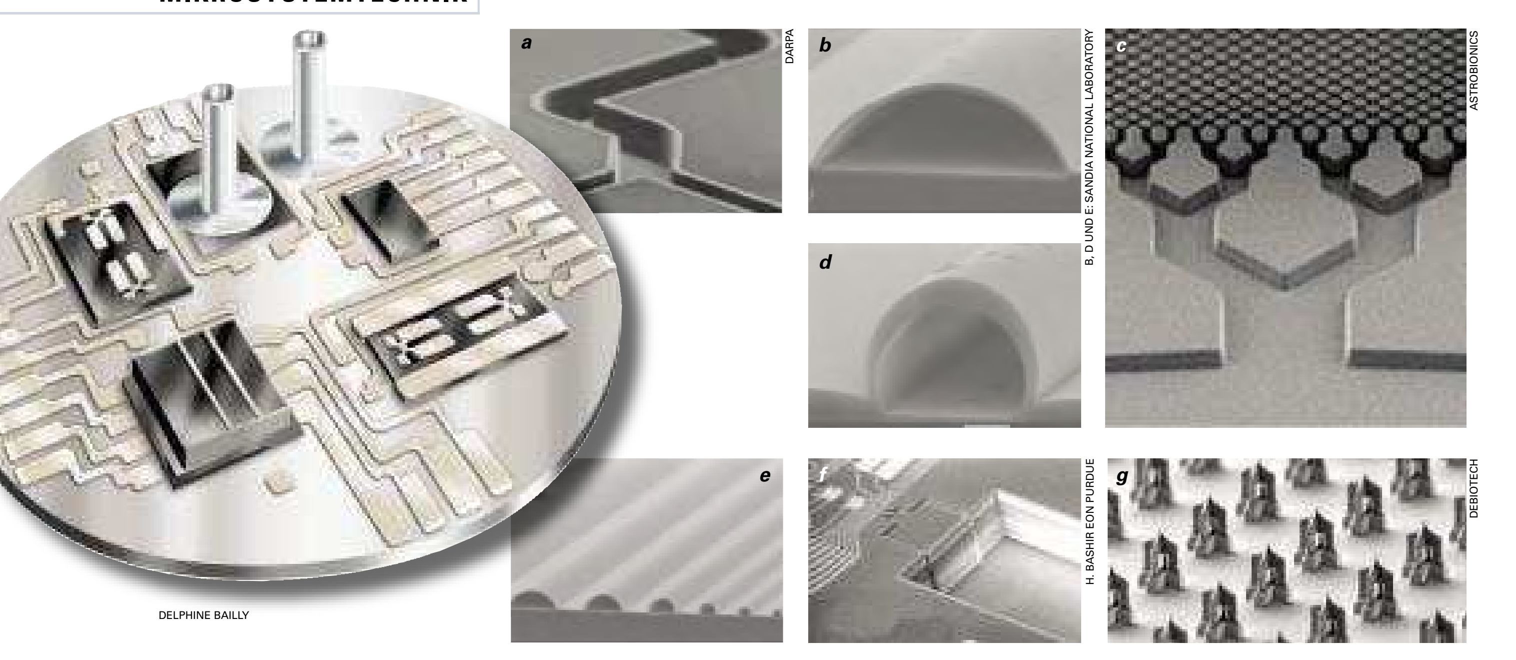
Legt man nun parallel zur Wand ein elektrisches Feld an, setzen sich Letztere in Bewegung. Die restliche Flüssigkeit, die elektrisch neutral ist, wird dabei en bloc mitgezogen und es entsteht eine »elektroosmotische Strömung«. Ihre Geschwindigkeit ist in der gesamten Leitung homogen, nur in der elektrischen Doppelschicht fällt sie sehr rasch auf null ab. Dieses Profil unterscheidet sich grundlegend von einer klassischen Poiseuille-Strömung, wie sie ein Druckgradient hervorbringt. Denn darin entwickelt sich die Geschwindigkeit im Leitungsquerschnitt wie eine Parabel – null an der Wand und im Zentrum maximal.

Ein für Gase geeigneter Mikropumpentyp beruht auf der so genannten thermischen Transpiration (auch: thermisches Kriechen). Er besteht aus zwei gegeneinander wärmeisolierten, makroskopischen Behältern (1 und 2), die durch ein Mikrorohr mit einem Durchmesser deutlich kleiner als die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle verbunden sind. Behälter 1 bleibt auf niedriger ▷

Vakuum dank glatter Wand

Eine Mikropumpe neuen Typs arbeitet nach dem Prinzip der thermischen Akkommodation. Moleküle bewegen sich aus Gefäß 1 in Richtung Gefäß 2, obwohl beide Behälter die gleiche Temperatur haben. Dieser Prozess beruht auf der Beschaffenheit der Wände in den Verbindungskanälen: Das Röhrchen zwischen Reservoir 1 und 3 hat eine glatte Wand, und die Moleküle aus Reservoir 1 springen in flacherem Winkel von der Wand zurück, wenn sie den kalten Abschnitt des Röhrchens erreichen. Die Moleküle aus Behälter 3 dagegen prallen steiler ab, weil sie sich von kalt nach warm bewegen. Aus diesem Grund bleiben sie häufig im Kanal gefangen. Konsequenz: Mehr Moleküle schaffen es von Behälter 1 nach Behälter 3 als umgekehrt. Der Mikrokanal zwischen Reservoir 3 und 2 ist rau und lenkt die Teilchen zufällig ab, sodass sie beide Richtungen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit einschlagen. In der Summe wandern die Moleküle demnach von Reservoir 1 zu Reservoir 2. Wenn man weitere Behälter nach dem gleichen Prinzip anschließt, addieren sich die entstehenden Druckgefälle und erzeugen in Reservoir 1 ein starkes Vakuum.





▲ **Ein Labor auf einem Chip stellt eine der vielversprechendsten Anwendungen der Mikrotechnik dar. Typische Elemente eines solchen Systems sind Mikroleitungen (a bis e), Mikronadeln (f) und Behälter (g).**

▷ Temperatur, während 2 beheizt wird und zudem (makroskopisch) zur Umgebung offen ist. Durch den Temperaturunterschied längs des Mikrorohrs geschieht etwas Bemerkenswertes: Gas aus 1 strömt in den wärmeren Behälter 2 (und in die Umgebung) und der Druck in Gefäß 1 fällt ab! Das verbindende Mikrorohr ist nämlich so klein gegenüber der freien Weglänge, dass sich Moleküle bei der Passage – egal aus welcher Richtung – nahezu nie treffen; man spricht von »freier Molekularströmung«.

Wie viele Moleküle in die Öffnung eintreten, ist deshalb unabhängig von der Situation auf der jeweils anderen Seite und ausschließlich proportional zur Dichte und zur mittleren Geschwindigkeit an der jeweiligen Öffnung. Mit dem idealen Gasgesetz lässt sich zeigen, dass die Eintrittsrate in die Öffnung wächst, je kleiner die Quadratwurzel der Temperatur dieser Seite ist. Konsequenz: Der Nettostrom der Teilchen verläuft von kalt nach warm und der Druck in Behälter 1 fällt ab.

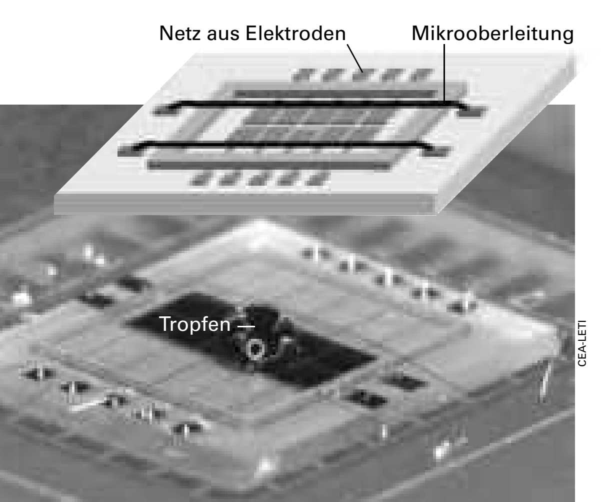
Eine Pumpe, die auf diesem Prinzip basiert, kommt völlig ohne bewegliche Elemente aus. Sie benötigt lediglich einen elektrischen Heizwiderstand, ist also sehr gut für Mikrosysteme geeignet. Leider sind der Maximaltemperatur von Behälter 2 und damit auch der erreichbaren Druckdifferenz technische Grenzen gesetzt. Wenn man jedoch mehrere Behälter in Serie schaltet, lässt sich der Druckabfall in Behälter 1 gefahrlos erhöhen – die Leistung der Pumpe steigt.

Einfalls- ungleich Ausfallswinkel

Um ihre Geschwindigkeit zu steigern, verwendet man mehrere Mikrorohre gleichzeitig. Derartige Mehrstufen-Mikropumpen sind aber noch Gegenstand der Grundlagenforschung.

Eine weitere Pumptechnik nutzt das Prinzip der thermischen Akkommodation (siehe Kasten vorige Seite): Wenn Gasmoleküle auf eine extrem glatte Wand treffen, prallen sie je nach deren Temperatur in unterschiedlicher Weise zurück. Ist die Wand wärmer als die Moleküle, gibt sie ihnen Energie mit und der Ausfallswinkel ist im Mittel steiler als der Einfallswinkel. Im umgekehrten Fall fliegen sie flacher weiter und kommen dann in den Mikrokanälen schneller vorwärts. Bei einem solchen System ist es deshalb leichter für ein Teilchen, aus einem warmen in ein kaltes Reservoir zu gelangen. Ist die Wand dagegen rau, prallen die Moleküle in zufälliger Weise von der Wand zurück und ihre Bewegung hängt kaum von der Temperatur ab. Auch an solchen Mikropumpen, in denen sich glatte und raue Mikrokanäle abwechseln, arbeiten Ingenieure.

Mitunter ist es günstiger, mit einzelnen Tropfen statt mit strömenden Flüssigkeiten zu arbeiten. Bei einem genau festgelegten Volumen im Nano- und Mikroliterbereich verhält sich jeder Tropfen wie ein winziger Reaktor, in dem ein chemischer Prozess stattfindet. Man kann ihn auf einer Oberfläche vereinzeln, verschieben, teilen oder mit anderen Tropfen mischen. Zu diesem Zweck werden mehrere Techniken eingesetzt, basierend auf thermischen, elektrostatischen oder akustischen Mechanismen. Ein interessantes Beispiel ist die Elektrobenetzung (siehe Bild links). Hierbei



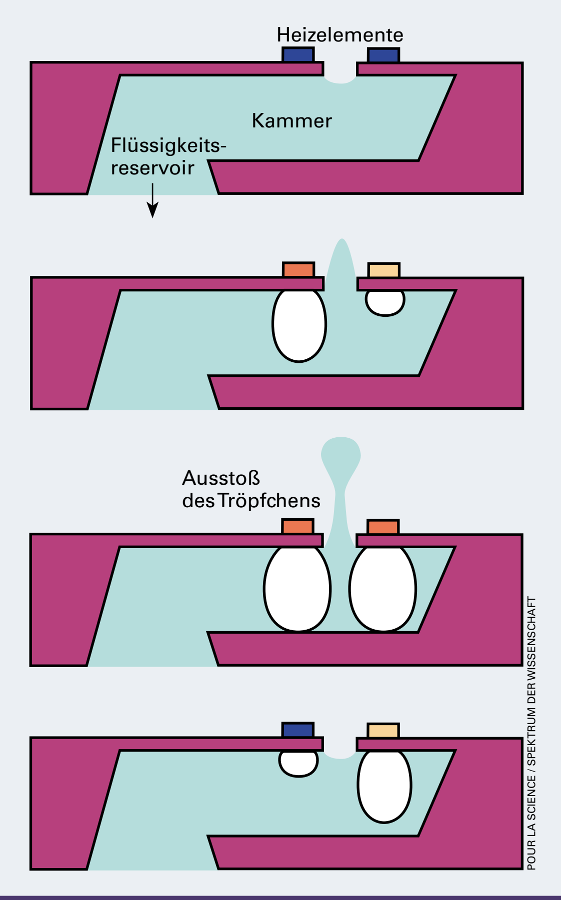
◀ **Zwei Netze aus hochfeinen Elektroden halten einen Tropfen auf einer Wasser abstoßenden Unterlage fest. Ihr elektrisches Feld wirkt auf einen Teil der Grenzlinie zwischen Tropfen und Unterlage und deformiert ihn. Der asymmetrisch gewordene Tropfen setzt sich in Bewegung und lässt sich durch das elektrische Feld nach Belieben lenken.**

Phasenübergänge sorgen für Bewegung

Jüngste Entwicklungen der Mikrofluidik nutzen den Übergang eines Fluids von der flüssigen zur gasförmigen Phase. Ein Beispiel dafür sind Tintenstrahldrucker: Heizwiderstände zu beiden Seiten einer Düse erzeugen Blasen in der mit Tinte gefüllten Kammer. Indem sie wachsen, verdrängen sie die Flüssigkeit und erhöhen den Druck in der Kammer (siehe Grafik), bis ein winziger Tropfen mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen wird. Wird die Heizung unterbrochen, genügt die Oberflächenspannung im Bereich der Öffnung, um die Kammer aus einem größeren Reservoir wieder zu füllen. Auf diese Weise lassen sich mehrere zehntausend Tropfen pro Sekunde erzeugen, jeder gerade einmal fünfzehn Mikrometer im Durchmesser, was einem Volumen von zwei Pikolitern entspricht.

Im Unterschied zu den schon bewährten, erfolgreichen Druckern sind *microheat pipes* eine noch neue Entwicklung. Es handelt sich dabei um Mikrokanäle, die an beiden Enden verschlossen sind und eine Flüssigkeit enthalten. Die Länge der dreieckig geformten Kanäle liegt im Millimeterbereich, die Dicke in der Größenordnung von hundert Mikrometern.

Der Prozess funktioniert so: Ein Ende des Kanals liegt nahe der Wärmequelle, sodass die Flüssigkeit in der *heat pipe* dort verdampft. Der sich bildende Dampf kondensiert am kälteren Ende und setzt Wärme frei. Schließlich strömt die Flüssigkeit in den Ecken des Kanals infolge der Kapillarkräfte von selbst zum warmen Ende zurück. Dieser Prozess setzt sich endlos fort. Weil das Verfahren die latente Wärme des Phasenübergangs ausnutzt – auf der heißen Seite wird latente Wärme zur Verdampfung aufgenommen, auf der kalten Seite wird diese wieder freigesetzt –, erreicht die Rate des Energietransports hohe Werte. Gruppen solcher *heat pipes* werden bereits auf Chips eingesetzt, um Elektronikbauteile mit hoher Leistung zu kühlen.



▶ **Tintenstrahldrucker können pro Sekunde mehrere zehntausend Mikrotröpfchen ausstoßen.**

zwingt man einen Tropfen, sich wie eine Straßenbahn über einem Netz aus Mikrodrähten fortzubewegen. Dabei gleitet er auf einer isolierenden, hydrophoben Schicht wie Teflon, unter der ein Raster von Elektroden liegt, die sich einzeln aktivieren lassen. Das elektrische Feld wirkt dann gezielt auf eine Region des Tropfens und beeinflusst dort lokal die Benetzungseigenschaften und damit den Winkel der Tropfenoberfläche mit der Unterlage. Er wird deformiert und setzt sich unter dem Einfluss der nun asymmetrischen Kräfte in Bewegung.

Erbsubstanz im Chiplabor

Viele potenzielle Einsatzgebiete mikrofluidischer Systeme erfordern eine sehr genaue Dosierung von Flüssigkeitsmengen. Zum Beispiel erproben Mediziner Pumpen, die in regelmäßigen Abständen Medikamente durch die Haut verabreichen, insbesondere Insulin für die Diabetesbehandlung. In der Biotechnik werden Chips entwickelt, die als Mikro-Analyselabors dienen *(lab-on-a-chip)*, etwa um den Cholesterinspiegel zu messen oder Zellen zu manipulieren (siehe Bilder links oben). So genannte DNA-Chips, die Abschnitte der Erbsubstanz in einer Probe identifizieren sollen, kommen bereits zum Einsatz (Spektrum der Wissenschaft 6/2002, S. 62). Sie tragen auf einer Fläche kaum größer als ein Quadratzentimeter einige hundert oder tausend Molekularsonden. Eingesetzt werden sie beispielsweise, um Krankheitserreger zu identifizieren, eine Aufgabe, die bislang langwierige Kulturmethoden erforderte. Für das Chipverfahren muss der Kranke eine Blut- oder Serumprobe liefern, aus der die DNA des verdächtigen Bakteriums, Virus oder Parasiten isoliert wird. Die gereinigte Erbsubstanz wird in winzige Vertiefungen auf dem Chip gegeben, in denen jeweils verschiedene synthetische DNA-Stränge sitzen. Passt die Sequenz der Erreger-DNA zu einem davon, bleibt sie an ihm hängen. Weil die Probe zuvor beispielsweise mit fluoreszierenden Molekülen markiert wurde, lässt sich die entsprechende Vertiefung auf dem Chip optisch erkennen. Auf diese Weise ergibt jeder Krankheitserreger ein charakteristisches Muster, durch das er sich sofort verrät.

Während die theoretische Beschreibung der Phänomene Fortschritte macht, hapert es bei den experimentellen Verfahren. Techniken, Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur und Druck zu messen, erlauben selten räumliche Auflösungen bis zu einem Mikrometer. Zwar messen Ingenieure schon Durchflussraten von 10^{-13} Kubikmeter pro Sekunde, doch das ist immer noch um Größenordnungen zu wenig. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

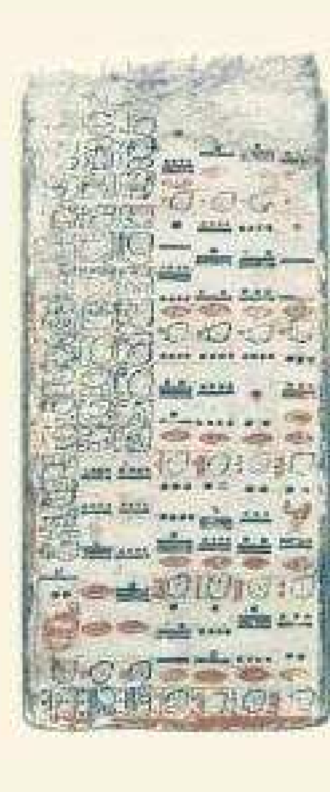


Der Ingenieur **Stéphane Colin** lehrt am Institut national de sciences appliquées (INSA) in Toulouse. Er leitet zudem die Arbeitsgruppe für Mikrofluidik der französischen Gesellschaft für Hydrotechnik. Die Redaktion dankt dem Experten für Mikrofluiddynamik Peter Ehrhard vom Forschungszentrum Karlsruhe für fachliche Unterstützung.

The MEMS handbook. Von M. Gad-el-Hak, CRC Press, New York 2002

Microfluidics and bioMEMS applications. Von F. E. H. Tay, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002

Das Rätsel des Mayakalenders



Nach wie vor grübeln die Forscher darüber, wie sich die Kalendersysteme der Maya in unsere Zeitrechnung übertragen lassen. Des Rätsels Lösung liegt womöglich im Dresdener Codex und in anderen astronomischen Aufzeichnungen, die uns das mesoamerikanische Volk hinterlassen hat – was die Datierung dieser Hochkultur um 208 Jahre verschöbe.

Von Andreas Fuls

Als spanische Konquistadoren im 16. Jahrhundert von Amerika nach Europa zurückkehrten, hatten sie nicht nur Säcke voller Gold und Silber dabei. Unter den exotischen Mitbringseln muss sich auch eine Bilderhandschrift der Maya aus Yukatan befunden haben, die heute als Schmuckstück in der Sächsischen Landesbibliothek in Dresden aufbewahrt wird. Dieser »Codex Dresdensis« war 1739 in Wien aufgetaucht und wurde vom damaligen Leiter der Königlich Sächsischen Bibliothek, Johann Christian Götze, erworben.

Um das aus 39 doppelseitig beschriebenen Rindenpapierblättern bestehende Manuskript der Wissenschaft besser zugänglich zu machen, ließ der Bibliotheksleiter Ernst W. Förstemann 1880 mit dem neuen Verfahren des Farblichtdrucks ein Faksimile erstellen. Der Sprachwissenschaftler war selbst einer der Ersten, die sich wissenschaftlich mit der einzigartigen Mayahandschrift befassten und die darin enthaltenen Zahlen und Kalenderdaten analysierten.

Die Mayakultur hatte sich ab dem zweiten oder ersten vorchristlichen Jahrtausend in einem Gebiet ausgebreitet, das die heute zu Mexiko gehörende Halbinsel Yukatan umfasst sowie Teile von Belize, Guatemala, El Salvador und Honduras (siehe Karte auf Seite 58). Im Laufe der Jahrhunderte entstanden politisch unabhängige Zentren mit Pyramiden, Tempeln, Palästen, Stelen, Altären und Ballspielplätzen. An der Spitze der Gesellschaft jedes Zentrums stand ein Herrscher, der den Titel *ahaw* (»Herr« oder »Fürst«) trug und sowohl politische als auch religiöse Aufgaben wahrnahm. Die Verbindung von Politik, Religion, Weltbild, Kalender und Astronomie war sehr innig, und so verwundert es nicht, dass viele Bauwerke nach astronomischen Himmelserscheinungen ausgerichtet sind. In den Städten Tikal und Uaxactún gibt es Visierlinien zwischen den Tempeln, die zum Sonnenaufgang bei den Tag-und-Nacht-Gleichen beziehungsweise bei der Sommer- oder Wintersonnenwende zeigen.

Nur vier Maya-Handschriften

Ihre astronomischen Beobachtungen notierten die Maya gewiss in einer Vielzahl von Büchern, die sie aus gefaltetem Rindenpapier herstellten. Da das Material vergänglich war, wurden immer wieder Abschriften erstellt. Die spanischen Eroberer berichteten von Buchhäusern, in denen wie in heutigen Bibliotheken die Handschriften lagerten – in ihren Augen alles Zeugnisse gefährlichen Aberglaubens, die verbrannt werden mussten. Nur vier Maya-Codices entkamen diesem Schicksal. Drei von ihnen werden nach ihren heutigen Aufbewahrungsorten Dresdener, Pariser und Madrider Codex genannt. Der vierte, der Grolier Codex, tauchte erst Mitte des 20. Jahrhunderts auf; er verdankt seinen Namen dem Grolier Club in New York, in dem er erstmals ausgestellt wurde.

Heute kann man die eigentümliche Hieroglyphenschrift der Maya fast vollständig entziffern und lesen, aber am Anfang der Forschung vor hundert Jahren waren nur die Kalenderzeichen und das Zahlensystem bekannt. Die Maya zählten im Vigesimalsystem, also in 20er Einheiten, und da sie die Null kannten und eine Stellenwertschreibweise nutzten, konnten sie mit extrem großen Zahlen umgehen. Die verschiedenen astronomischen Tafeln des Dresdener Codex enthalten Kalenderdaten und Berechnungen zu Venus, Mars, Mond, Sonne und Sternen sowie zu Sonnenfinsternissen. Deswegen stellt diese Handschrift die wichtigste Quelle zur Mayaastronomie dar.

Bereits Förstemann hatte auf den Seiten 24 und 46 bis 50 des Dresdener



Codex eine Tafel erkannt, in der die Zeiten der Sichtbarkeit und Unsichtbarkeit der Venus notiert sind (Bild oben). Die Mayapriester wussten, dass der Planet, der zeitweise als Abendstern am Westhimmel und als Morgenstern am Osthimmel zu sehen ist, alle 584 Tage am Firmament die gleiche Stellung zur Sonne einnimmt – beispielsweise die östliche Extremstellung zur Sonnenscheibe. Im modernen Sprachgebrauch ist das die synodische Umlaufzeit der Venus. Fünf Venusumläufe am Himmel dauern somit 2920 Tage, das ist genau das Achtfache eines Sonnenjahres zu 365 Tagen.

Zyklische Kalendersysteme

Auf fünf Seiten der Venustafel ist je ein Venusumlauf beschrieben sowie das dazugehörige Datum im 365-tägigen Sonnenkalender, dem Haab. Um die Venustafel auch an den ebenfalls genutzten 260-tägigen religiösen Kalender, den Tzolk'in, anzupassen, wurde die Tafellänge auf 65 Venusumläufe ausgedehnt. Nach dieser Zeitspanne von 37960 Tagen traf der Venuszyklus mit beiden Kalenderzyklen wieder zusammen, und die Tafel konnte von vorn beginnen (37960 = 65 × 584 = 104 × 365 = 146 × 260).

Allerdings ist der mittlere Venuszyklus nicht genau 584 Tage lang, sondern 0,08 Tage kürzer. Über lange Zeiträume treten deshalb Abweichungen von den in der Venustafel enthaltenen Daten auf.

Um nicht die Kalenderdaten im Tzolk'in verändern zu müssen, wandten die Maya einen genialen Trick an: Sie suchten eine Zeitspanne, die ein Vielfaches von 260 Tagen und zusätzlich um einige Tage kürzer ist als ein Vielfaches der gerundeten 584-tägigen synodischen Umlaufzeit der Venus. Diese Korrekturperioden notierten sie im Dresdener Codex, um sie zum Startdatum der Venustafel hinzurechnen zu können. (Dieses Startdatum schreibt man in der üblichen Notation als 9.9.9.16.0, 1 Ahaw 18 K'ayab, wobei die erste Angabe die Darstellung in der so genannten Langen Zählung ist, in der die Tage in einem Zwanzigersystem fortlaufend gezählt werden; die zweite ist die Darstellung im Tzolk'in/Haab-Kalender.)

Direkt an die Venustafel schließt sich im Dresdener Codex eine Finsternistafel an, deren 69 Kalenderdaten genau den Intervallen von möglichen Sonnenfinsternissen entsprechen (Bild auf Seite 54). Ob eine Sonnenfinsternis tatsächlich auch in ihrem Gebiet beobachtbar sein würde, konnten die Maya zwar nicht vorherberechnen. Aber sie wussten, dass sie nur dann stattfinden kann, wenn nach jeweils sechs Monaten der Neumond erneut dicht genug an einem der beiden Mondknoten steht, also an den Schnittpunkten von Mondbahn und Sonnenbahn, der Ekliptik. Da sechs synodische Monate (177,18 Tage) etwas länger sind als ein halbes Finsternisjahr (173,31 Tage), nach dem sich die Mondknotenposition der Sonne wiederholt, musste von Zeit zu Zeit ein fünfmonatiges Intervall eingeschoben werden.

Diese kurzen Finsternisintervalle sind in der Tafel durch Bilder hervorgehoben, die den Tod der jungen Mondgöttin, den Todesgott oder die typische Finsternisglyphe – halb hell, halb dunkel, mit dem Sonnensymbol in der Mitte – darstellt. Das Auftreten dieser Glyphe in anderen Inschriften lässt die ▷

▲ Der Dresdener Codex ist die wichtigste Quelle zur Astronomie der Maya. Die so genannte Venustafel in dieser Bilderhandschrift gibt die Sichtbarkeit der Venus als Morgen- beziehungsweise Abendstern an. Während eine Seite (im Foto links) Korrekturtabellen enthält, beschreiben die anderen fünf Seiten je einen Sichtbarkeitszyklus – einen synodischen Umlauf – der Venus am Himmel.


ERNST W. FÖRSTEMANN, BEARBEITET VON ANDREAS FULS

Die Finsternistafeln im Dresdener Codex beschreiben 69 Finsterniszyklen und umfassen damit 11 960 Tage, also etwa 33 Jahre. Die Bilder mit Götterdarstellungen wurden jeweils nach einem kurzen Finsternisintervall von nur fünf Monaten eingefügt.

Schlussfolgerung zu, dass sie den Übergang der Sonne vom Bereich des Lebens in den Bereich der Dunkelheit und des Todes symbolisierte (Bild rechts unten).

Das gleiche Kalendersystem wie im Dresdener Codex entdeckten die Mayaforscher auch in Inschriften, die in diverse Steinmonumente gemeißelt waren. Förstemann hatte festgestellt, dass die Maya eine fortlaufende Tageszählung verwendeten, die man heute Lange Zählung nennt. Mit dieser Zeitrechnung konnten die Maya Begebenheiten und Himmelsereignisse auf den Tag genau fixieren, da sie als einheitliches Startdatum die Tage seit der mythologischen letzten Erschaffung der Welt zählten.

Die Standardchronologie

Doch mit welchem Datum des christlichen Kalenders korreliert das Anfangsdatum der Langen Zählung? Dies war eine der interessantesten Fragen, mit denen sich die Mayaforscher konfrontiert sahen. Denn von einer zuverlässigen Antwort hing auch das Alter der Mayakultur ab.

Der amerikanische Geschäftsmann und Journalist Joseph Goodman (1838–1917) war der erste, der durch Angabe eines Startdatums der Langen Zählung im christlichen Kalender die Mayageschichte in einem absoluten Zeitrahmen verankerte. Durch Vergleich spanischer und yukatekischer Chroniken aus dem 16. bis 18. Jahrhundert mit dem Mayakalender bestimmte Goodman 1905 als Startdatum der Langen Zählung den 3. September 3114 v. Chr. (alle Daten vor 1582 werden im Julianischen Kalender angegeben).

Der mexikanische Astronom Juan Martínez verschob diese Korrelation 1926 um einen Tag. Im Jahr 1927 schließlich korrigierte der Engländer J. Eric S. Thompson sie um vier weitere Tage auf den 8. September 3114 v. Chr., um das Mondalter – die Anzahl der seit Neumond vergangenen Tage – auf die inzwischen entschlüsselten Mondserien anzupassen, die man auf verschiedenen Stelen entdeckt hatte.

Dieser 8. September 3114 v. Chr. – nach den Anfangsbuchstaben der drei Forschernamen gemeinhin als GMT-Korrelation bezeichnet – gilt den meisten Mayaforschern als Anfangsdatum der Langen Zählung und wird bis heute als Standardchronologie verwendet.

Im Vergleich zur julianischen Tageszählung, die der Niederländer Joseph Justus Scaliger (1540 – 1609) für astronomische Zwecke eingeführt hat und mit der die seit dem 1. Januar 4713 v. Chr. vergangenen Tage fortlaufend gezählt werden, ergibt sich ein Unterschied von 584 285 Tagen. Diese Zahl ist die Korrelationskonstante zwischen Langer Zählung und unserem modernen Kalendersystem.

Klassische Periode der Mayakultur

Mit der Standardchronologie lassen sich nun Daten der Langen Zählung, die in diversen Mayainschriften gefunden wurden, in die entsprechenden Daten unseres modernen Kalenders übertragen. Demnach wäre die klassische Periode der Mayakultur in den Zeitraum von etwa 300 n. Chr. bis 830 n. Chr. einzuordnen, die Postklassik in die Zeit ab etwa 1100 n. Chr. bis zur spanischen Eroberung. Allerdings nehmen die Vertreter der Standardchronologie an, dass es zwischen der Klassik und der Zeit der spanischen Herrschaft keine Kalenderreform gab.

Eine solche ist jedoch wegen der gesellschaftlichen und kulturellen Umbrüche, die zweifellos stattgefunden haben, nicht auszuschließen. Auch Übertragungsfehler in den Abschriften aus dem 16. bis 18. Jahrhundert sind denkbar. ▷

IN KÜRZE

- Die **Maya** verwendeten ein kompliziertes **Kalendersystem** aus drei ineinander verschachtelten Zyklen, das astronomische Erscheinungen und religiöse Vorstellungen innig verband.
- Nicht eindeutig gelöst ist die Frage, wie sich Daten aus dem Mayakalender in unser modernes Zeitrechnungssystem übertragen lassen. Die Mayaforscher haben zwar eine **Standardchronologie** erstellt, doch gibt es viele Diskrepanzen zu den bekannten periodischen Erscheinungen der Himmelskörper.
- Eine Analyse der im **Dresdener Codex** und in Inschriften überlieferten astronomischen Daten ergibt eine Korrelation zwischen Mayakalender und modernem Kalender, die gegenüber der Standardchronologie **um 208 Jahre abweicht**. Demzufolge wäre die klassische Epoche der Maya nicht im 9., sondern erst im 11. nachchristlichen Jahrhundert untergegangen.

Immerhin widersprechen sich diese Quellen aus der Kolonialzeit teilweise um einige Tage oder sogar Jahre. Die GMT-Korrelation stützt sich hingegen nur auf den Bericht des Bischofs Diego de Landa, der um 1566 entstand, und auf die einzig verbliebene Seite der Chronik von Oxcutzcab aus dem Jahr 1685.

Des Weiteren sahen sich die Mayaforscher mit dem Problem konfrontiert, die kolonialen Quellen mit den astronomischen Daten aus der Klassik in Übereinstimmung zu bringen. Denn als Thompson die GMT-Korrelation an das Mondalter anpasste, baute er unweigerlich einen Fehler zu den kolonialen Quellen ein. Deswegen propagierte er 1950 zwei verschiedene Korrelationen: die GMT-Korrelation für die Zeit der Klassik und eine um zwei Tage modifizierte GMT2-Korrelation für die Kolonialzeit. Diese Verschiebung begründete er mit einem Wechsel in der Zählweise der Tage.

Welche Korrelationskonstante gilt?

Der Widerspruch ist allerdings viel größer. Denn als der US-Archäologe Sylvanus G. Morley 1920 die Chronik von Oxcutzcab interpretierte, legte er alle Jahresanfänge auf das Ende des vorhergehenden Jahres, obwohl die Chronik zu jedem Datum im Tzolk'in auch den ersten Tag im Haab als Jahresbeginn angibt. Ohne die stillschweigende Übernahme dieser Fehlinterpretation hätte Thompson eine um 364 Tage spätere Korrelation erhalten, also eine Korrelationskonstante von 584649. Dieser Wert würde weder zur Venustafel im Dresdener Codex passen (346 Tage Abweichung) noch zu den Inschriften, in denen das Mondalter angegeben ist (9 Tage Abweichung).

Überhaupt äußern gerade Archäoastronomen Zweifel an der Standardchronologie. Denn mit dieser Korrelation fällt etwa nur die Hälfte der im Codex Dresden enthaltenen Finsternisdaten auf ein Datum, zu dem tatsächlich irgendwo auf der Erde eine Sonnenfinsternis sichtbar war. Auch zu den astronomischen Ereignissen, die in Inschriften auf verschiedenen Mayastelen und -bauwerken gefunden wurden, liefert die Standardchronologie keine befriedigende Übereinstimmung, wie etwa der Archäologe David H. Kelley festgestellt hat.

Solche Inschriften sind vor allem dann interessant, wenn sich Kalenderdaten und Visierlinien auf das gleiche astronomische Ereignis beziehen und damit die astronomische Interpretation in sich bestätigen. In Tikal und Uaxactún notierten die Maya direkt neben den Visierlinien zur Sonne Paare von Kalenderdaten, die Vielfache von tropischen Jahren auseinander liegen. (Ein tropisches Jahr oder Sonnenjahr entspricht 365,24219 mittleren Sonnentagen, das ist die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Durchgängen der mittleren Sonne durch den Frühlingspunkt, den Schnittpunkt von Ekliptik und Himmelsäquator.) Zusammen mit anderen Paaren von Kalenderdaten aus anderen Orten ergeben sie vier Gruppen von Daten, die einen Abstand von jeweils einem Viertel eines Jahres aufweisen. Folglich ist zu vermuten, dass diese Daten auf die vier ausgezeichneten Stationen der Sonne im Laufe eines Jahres fallen: die Tag-und-Nacht-Gleichen und die Sommer- und Wintersonnenwende. Allerdings weichen die Kalenderdaten in der Standardchronologie um etwa 45 Tage davon ab, wie Kelley herausfand.

Im Prinzip lassen sich die Unwägbarkeiten, die mit der Standardchronologie – und überhaupt mit dem Übertragen der Daten aus kolonialen Quellen auf die klassische Epoche der Maya – verbunden sind, vermeiden, indem man direkt Inschriften mit astronomischen Angaben aus der Klassik für eine Datierung heranzieht.

Allerdings gibt es auch hier Probleme. Zunächst ist zu fragen, ob die Inschrift tatsächlich eine auf Beobachtungen beruhende astronomische Information enthält. Denn da für die Maya Astronomie und Astrologie eines war, vermischen sich Beschreibungen von tatsächlichen Himmelsereignissen mit denen religiöser Vorstellungen.

Zudem sind astronomische Ereignisse mehrdeutig, weil jede Planetenkonstellation periodisch wiederkehrt. Nur durch Kombinieren verschiedener astronomischer Ereignisse lässt sich entscheiden, welches dem notierten Datum im Mayakalender entsprach. So nahm der Astronom Charles H. Smiley 1975 für das Startdatum der Venustafel eine sichtbare Sonnenfinsternis an, um die Korrelation auf den 2. Juli 3344 v. Chr. festzulegen (mit der Korrelationskonstante 482639). Seine Fachkollegin Maud W. Makemson hatte 1946 eine seltene Kombination aus zwei Sonnenfinsternissen und einer Mondfinsternis innerhalb von dreißig Tagen zur Korrelationsbestimmung verwendet, womit sie eine Konstante von 489138 erhielt.

Allerdings passen beide Vorschläge nicht zum Mondknoten, wie er korrelationsunabhängig 1930 von dem Chemieingenieur John Teeple anhand der Finsternisdaten im Dresdener Codex bestimmt worden war. Ebenso unbefriedigend wie die Korrelationen von Smiley und Makemson ist der Vorschlag von Nancy K. Owen von 1973, der auf eine Serie von Sonnenfinsternissen beruht, aber Vollmond statt wie erwartet Neumond ergibt. Der Missionar Damian Kreichgauer hatte 1927 eine Korrelation bestimmt, die zur Venus und zur Mondphase passt, aber zum Mondknoten einen Widerspruch von elf Tagen aufweist.

Erster Schritt: astronomische Ereignisse identifizieren

Bisher wurden sechs Korrelationen vorgeschlagen, die auf kolonialen Quellen beruhen, und mindestens 18 verschiedene Korrelationen aus astronomischen oder anderen Überlegungen bestimmt. Diese Vielfältigkeit zeigt die Problema- ▷

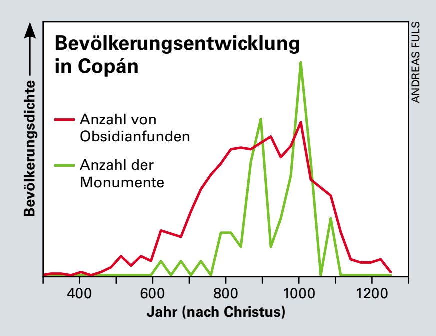


ERNST W. FÖRSTEMANN, BEARBEITET VON ANDREAS FULS

Unter dieser Finsternisglyphe im Dresdener Codex ist eine Schlange mit geöffnetem Rachen abgebildet.

Datierungsverfahren in der Mayachronologie

Die Maya lebten nicht im Vakuum. Die scheinbare Bewegung der Himmelskörper beeinflusste ihr Leben ebenso wie Kriege und Heiratsbündnisse mit den Nachbarvölkern oder der Obsidianhandel mit dem Hochland von Guatemala. Die Verbindungen der Mayakultur zur »Außenwelt« ermöglicht verschiedene Datierungen, die zur Überprüfung der Chronologie herangezogen werden können.

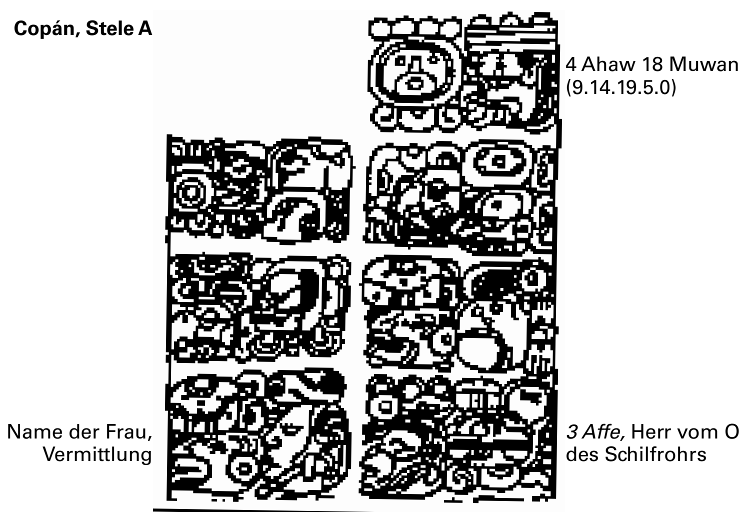


ANDREAS FULS

Obsidiandatierung in Copán

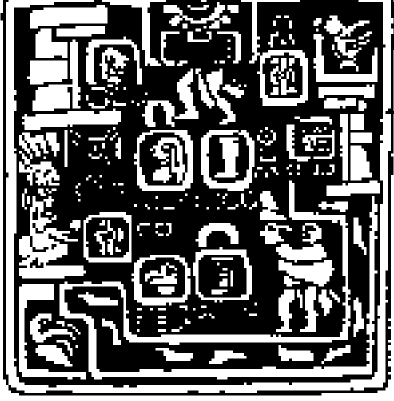
Obsidian ist ein Feuerstein und war in der Mayaklassik eine Art Massenware, aus der alle Schichten der Bevölkerung ihre Waffen und Werkzeuge herstellten; nach Gebrauch wurde er weggeworfen. Die Verweildauer von Obsidian in der Erde kann man heute über die Dicke der Hydrationsschicht an der Oberfläche des Materials bestimmen. Somit lässt sich die Menge des genutzten Obsidians über die Zeit ermitteln und daraus auf den Verlauf der Bevölkerungsdichte schließen.

In der Mayastadt Copán stieg demnach die Bevölkerungsdichte ab 500 n. Chr. langsam an, erreichte zwischen 800 und 1000 n. Chr. ein Maximum und nahm danach rapide ab. Der Bevölkerungsrückgang ereignete sich etwa 200 Jahre später, als nach der GMT-Korrelation anzunehmen wäre, da die letzte Inschrift in Copán (9.19.11.14.5) in das Jahr 822 n. Chr. fallen würde. Dieses Monument, dessen Rückseite unvollendet blieb, beschreibt die Thronbesteigung des letzten Herrschers von Copán. Nach der neuen Chronologie von Wells und Fuls fiel dieses Datum auf den 19. Dezember 1029 n. Chr., was mit dem Bevölkerungsrückgang und dem Verlassen der Mayastadt Copán übereinstimmt.



LINDA SCHELE UND PETER MATHEWS, THE CODE OF KINGS, SCRIBNER, NEWYORK 1998, S. 157

Xochicalco, Panel L2



Jahr 4 Hase, Tag 6 Fuß

Herrscher *2 Erdbeben*

3 Affe zuerst im Ort des Macaw-Tempels (Copán)

Dann trägt er eine Person (die Frau) nach Xochicalco

VICTOR E. VILLASEÑOR

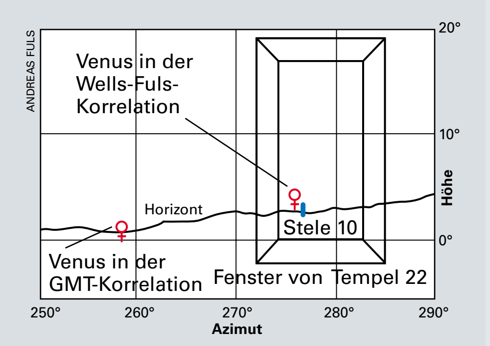
Mixtekische Kontakte

Während der Spätklassik gab es zahlreiche Kontakte zwischen den Maya und ihren zentralmexikanischen Nachbarn, den Mixteken. Das am besten datierbare Ereignis ist der Besuch des mixtekischen Adligen *3 Affe* in Copán, dessen Besuch auf Stele A mit dem Datum 9.14.19.5.0 (GMT: 1. Dezember 730 n. Chr., Wells-Fuls: 13. Oktober 938 n. Chr.) dokumentiert wurde (Bild ganz oben). *3 Affe* kam damals als 16-jähriger nach Copán, um als Heiratsvermittler eine Frau nach Xochicalco zu bringen. Der dortige Herrscher *2 Erdbeben* verewigte dieses Heiratsbündnis auf einer Inschrift in Xochicalco, dessen Jahresangabe 4 Hase (Bild oben) dem gleichen Jahr 938 n. Chr. entspricht wie die Umrechnung des Datums 9.14.19.5.0 in der Wells-Fuls-Chronologie (Tabelle unten). Die Zuordnung des Namens *3 Affe* ist deswegen eindeutig, weil es in der gesamten mixtekischen Genealogie nur eine männliche Person dieses Namens gab.

Lebenslauf von *3 Affe*

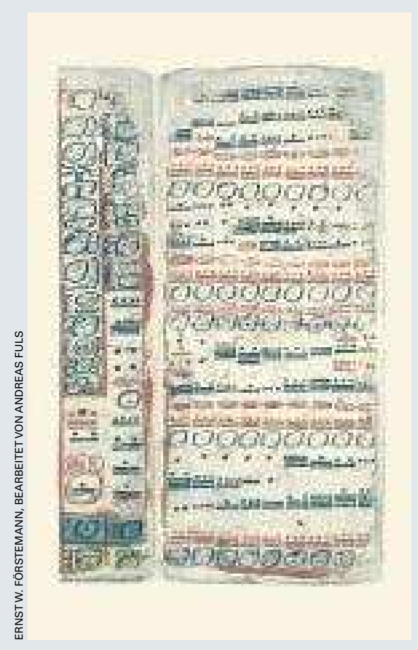
Quelle	Ereignis	Datum	Jahr
Bodley	Hochzeit der Eltern und Geburt von *3 Affe*	1 Kaninchen	922 n. Chr.
Copán	*3 Affe* in Copán als Vermittler	9.14.19.5.0	938 n. Chr.
Xochicalco	*3 Affe* vermittelt Hochzeit von *2 Erdbeben* mit einer Frau aus Copán	4 Hase	938 n. Chr
Nuttall	Tod von *3 Affe* und seinen Eltern	3 Rohr	963 n. Chr.
Bodley	Tod von *3 Affe*	12 Feuerstein	972 n. Chr.
Bodley	Tod der Eltern	6 Rohr	979 n. Chr.

ANDREAS FULS, NACH DAVID H. KELLEY, PERS. MITTEILUNG



Venustempel in Copán

Durch das schmale Fenster von Tempel 22 in Copán konnte man am westlichen Horizont Stele 10 mit dem eingemeißelten Datum 9.11.0.0.0 sehen. Zwei Tage zuvor war der Venustafel im Dresdener Codex zufolge die Venus als Abendstern sichtbar geworden; und da der Eingang von Tempel 22 mit Venussymbolen verziert ist, kann man das Erscheinen der Venus an diesem Datum im Fenster erwarten. Rechnet man mit der Standardchronologie (GMT-Korrelation) das Datum um, dann wäre Venus nicht im Fenster zu sehen gewesen. Nach der neuen, von Bryan Wells und dem Autor entwickelten Chronologie (Wells-Fuls-Korrelation) war Venus am 23. August 860 n. Chr. erstmals als Abendstern im Fenster sichtbar und ging direkt hinter der Stele unter.



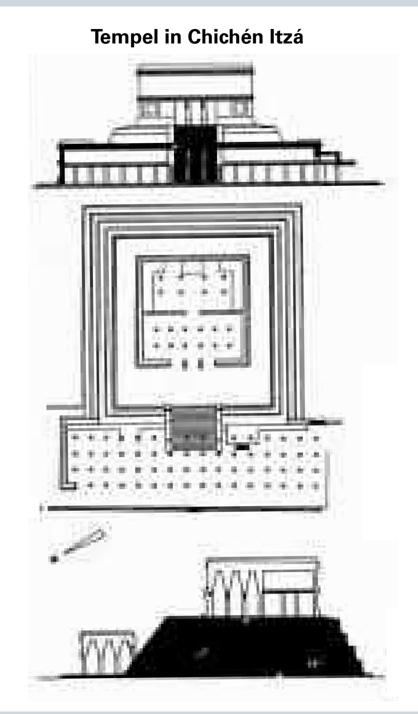
Marstafel

Diese Tafel aus der Dresdener Mayahandschrift enthält Vielfache von 780 Tagen, die der synodischen Umlaufzeit des Planeten Mars von 779,94 Tagen fast genau entsprechen. Die geringe Abweichung von 0,06 Tagen addiert sich nach 19 Umläufen zu ungefähr einem Tag auf, und auch diese Korrekturperiode ist in der Tafel aufgeschrieben worden. Die Kalenderdaten am Anfang dieser Marstafel fallen in der Wells-Fuls-Chronologie auf den 11. Februar 891 n. Chr. und den 10. Januar 1000 n. Chr.; an diesen Tagen stand der Rote Planet der Sonne fast genau gegenüber (in Opposition) und wies seine größte Helligkeit auf.

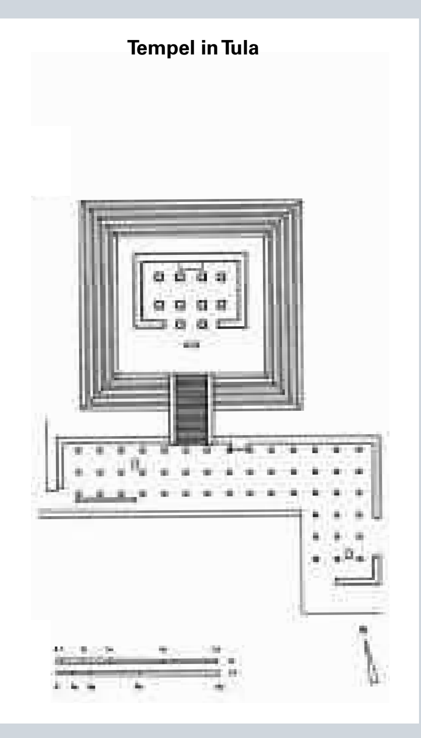
Stilentwicklung der Mayaschrift

In der Mayaschrift gab es eine kontinuierliche Weiterentwicklung der einzelnen Glyphen vom Anfang der Klassik bis zum Ende der Postklassik. Dabei hat der Epigrafiker Alfonso Lacadena García Gallo 1995 festgestellt, dass die zeitliche Entwicklung der Glyphen sich als stetige Kurve darstellen lässt, die aber in der Standardchronologie zwischen dem Ende der Klassik und dem Beginn der Postklassik eine Lücke von etwa 200 Jahren aufweist. Diese Lücke verschwindet in der neuen Chronologie.

Tempel in Chichén Itzá



Tempel in Tula



Tolteken in Chichén Itzá

Die Kalenderdaten in Chichén Itzá belegen eine relativ kurze Geschichte von 10.1.17.15.13 bis 10.8.10.11.0, was in der GMT-Korrelation der Zeitspanne von 867 – 998 n. Chr., in der Wells-Fuls-Korrelation von 1075 – 1206 n. Chr. entspricht. Die frappierende Ähnlichkeit von Pyramiden, Ballspielplätzen und langen Säulenhallen mit Bauwerken aus Tula lässt sich nur dann als toltekischer Einfluss in Chichén Itzá erklären, wenn durch die neue Mayachronologie Chichén Itzá zeitgleich mit dem Reich der Tolteken (1000 bis 1200 n. Chr.) existierte. Die Präsenz von *6 Feuerstein*/Mixcoatl und seinem Schwiegersohn *8 Hirsch*/Quetzalcoatl sowohl in mixtekischen Codizes als auch auf dem Ballspielplatz in Chichén Itzá belegen die historische Relevanz in der neuen Mayachronologie.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Kultur der Maya erstreckte sich über ein Gebiet, das die Halbinsel Yukatan im Südosten Mexikos sowie die Dschungel und Hochländer der heutigen Staaten Belize, Guatemala, El Salvador und Honduras umfasst. Gegen Ende der klassischen Periode mischten sich zentralmexikanische Einflüsse in die Mayakultur.

tik, eine widerspruchsfreie Berechung durchzuführen und dabei alle bekannten Kriterien zu erfüllen.

Deswegen stellte ich zusammen mit dem Archäologen und Epigrafiker Bryan Wells von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) zunächst eine Reihe von Kriterien auf, mit denen man eine als astronomisches Ereignis eingestufte Erwähnung als tatsächliche Himmelserscheinung identifizieren kann, bevor man sie für eine Korrelationsberechnung benutzt. So sollte jede Quelle – ob Codex oder Inschrift in Bauwerken – bis auf vereinzelte Schreib- oder Rechenfehler in sich konsistente Kalenderdaten aufweisen. Des Weiteren muss die Interpretation als astronomisches Ereignis unabhängig von einer Korrelation möglich sein. Das heißt: Das Ereignis lässt sich durch Glyphen, Visierlinien oder astronomische Intervalle begründen. Ferner muss die Interpretation durch andere Quellen verifizierbar sein, um Fehldeutungen zu vermeiden. Eine Bestätigung ergibt sich zum Beispiel, wenn die Neumondphase in der Sonnenfinsternistafel des Dresdener Codex mit den Mondinschriften auf den Stelen übereinstimmt, oder wenn die Kalenderdaten für die Wintersonnenwende durch die Sonnenaufgangsrichtung im Observatorium von Uaxactún untermauert wird.

Aus unserer Analyse konnten wir verschiedene Mayakalenderdaten identifizieren, die mit einer realen astronomischen Begebenheit verknüpft sein sollten. Das waren zum Beispiel das Startdatum der Venustafel, drei Daten aus der Sonnenfinsternistafel, die sich als Neumondphase belegen ließen (und an denen folglich eine Finsternis stattgefunden haben könnte, sofern die Sonne nahe genug an einem der beiden Mondknoten stand) sowie zwei mögliche Kalenderdaten für den Frühlingsanfang. Nun untersuchten wir, ob es eine dazu passende Korrelation gibt.

Zweiter Schritt: Korrelation suchen

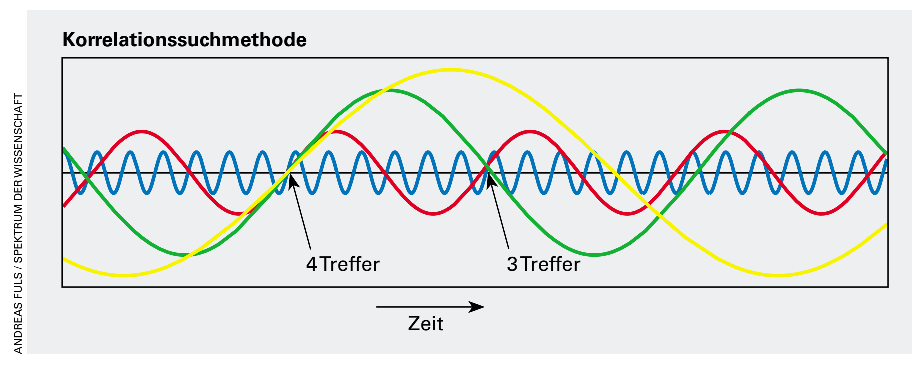
Die Suche nach der richtigen Kombination dieser Korrelationsbedingungen glich der Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen: Schrittweise erhöhten wir die Korrelationskonstante um jeweils einen Tag, bis wir einen Zeitraum von 1200 Jahren überdeckten, und prüften dabei für jeden Schritt, ob folgende vier Bedingungen erfüllt sind:

- Die Venus erscheint als Morgenstern,
- es ist Neumond,
- die Sonne geht durch den Mondknoten,
- es ist Frühlingsanfang.

Auf diese Weise konnten wir nun überprüfen, ob nach der Umrechnung der ausgewählten Mayakalenderdaten in den christlichen Kalender das Datum mit dem astronomischen Ereignis übereinstimmte.

Eine solche Sisyphusarbeit hatte Thompson vor 65 Jahren noch als Zeitverschwendung angesehen. Heutzutage kann ein Computer diese Aufgabe in einer Stunde erledigen. Unser Resultat war äußerst interessant: Die vier astronomischen Bedingungen haben zusammen ein kleinstes, gemeinsames Vielfaches von etwa 2243 Jahren. Deswegen ergab die Suche über 1200 Jahre höchstens eine Lösung für jede Kombination der Korrelationsbedingungen. Von den fünf gefundenen Korrelationskonstanten lagen allerdings vier zwischen 3688 und 3408 v. Chr., was die Mayakultur um einige Jahrhunderte älter machen würde. Das aber stünde in eindeutigem Widerspruch zu den archäologischen Befunden und historischen Chroniken, denn dadurch würde sich die »Lücke« zwischen dem Ende der Klassik und dem Beginn der Postklassik, die bereits nach der Standardchronologie hundert bis zweihundert Jahre lang ist, noch vergrößern. Nur die fünfte Korrelationskonstante, die das Startdatum der Langen Zählung in das Jahr 2906 v. Chr. legt, passt viel besser dazu und verschiebt das Ende der klassischen Mayakultur um 208 Jahre vom 9. in das 11. nachchristliche Jahrhundert.

Gleichwohl zogen wir weitere astronomische Daten heran, um die fünf berechneten Korrelationen näher zu überprüfen. Wiederum war die einzige Korre-



ANDREAS FULS / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Mittels Computers untersuchte der Autor gemeinsam mit Bryan Wells, wann innerhalb eines bestimmten Zeitraums vier astronomische Zyklen unterschiedlicher Länge zusammentreffen:
- Neumond (29,530588 Tage)
- Sonne in der Nähe eines Mondknotens (173,31 Tage)
- tropisches Jahr (365,2422 Tage)
- synodische Umlaufzeit der Venus (583,9229 Tage)

lation, die zu allen Überprüfungen passte, die Korrelationskonstante 660208, die das Startdatum der Langen Zählung auf den 21. Juli 2906 v. Chr. legt.

Exakt die gleiche Korrelation hatte Wells schon 1991 erhalten, als er einen mixtekischen Codex aus Wien mit der Dresdener Venustafel verglich. Nur konnte er damals nicht begründen, warum diese Korrelation die einzige sein sollte, die zu allen astronomischen Daten passt. Dies ist erst durch unsere Korrelationssuchmethode möglich geworden, die systematisch alle Kombinationsmöglichkeiten testet. Seitdem wir 1998 die neue Korrelation ermittelten, haben wir weitere, auch nichtastronomische Datierungen zur Überprüfung herangezogen (siehe Kasten auf der vorhergehenden Doppelseite). Sie stimmen im Rahmen ihrer jeweiligen Genauigkeit erstaunlich gut überein und bestätigen unseren Vorschlag zur neuen Chronologie der Mayakultur.

Welche Konsequenzen ergeben sich nun daraus? Eine der am heftigsten diskutierten Fragen der Mayaforschung ist, warum die klassische Kultur dieses mesoamerikanischen Volkes abrupt innerhalb von nur sechzig Jahren unterging. Dabei stehen sich zurzeit zwei Thesen gegenüber: eine, die klimatische Veränderungen, und eine andere, die kriegerische Aktivitäten als Ursache ansieht (Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 38).

Neudatierung des Niedergangs

Die Zunahme kriegerischer Aktivitäten am Ende der Klassik ist durch Wallanlagen und Inschriften belegt. Die Macht der Mayakönige brach zusammen, und die Städte wurden verlassen. Die Bevölkerungdichte verringerte sich überall auf etwa ein Zehntel, wie man durch Datierung von Obsidianfunden im Tal von Copán und durch siedlungsarchäologische Untersuchungen in Palenque und Tikal festgestellt hat. In Copán ist das letzte Monument auf einer Seite unvollendet geblieben, und in Xkipché fand man noch das Werkzeug vor, so als ob die Handwerker die Städte fluchtartig verlassen hätten.

In den Ruinen von Seibal, Ucanal, Jimbal und Machaquila vermischten sich Elemente aus der Mayaklassik mit solchen aus Zentralmexiko: Ein neuer Keramiktyp tauchte auf, und die abgebildeten Herrscher trugen zentralmexikanische Namen, Kalenderzeichen und Schmuck. Während im Süden die Bevölkerung abnahm, verzeichneten zur gleichen Zeit das nördlich gelegene Chichén Itzá und die Puuc-Region eine Bevölkerungszunahme. Viele Bauwerke in Chichén Itzá erscheinen wie eine Kopie aus dem 1300 Kilometer entfernten Tula in Zentralmexiko. Offenbar wurden neue Ideen importiert wie Säulenhallen, Chac Mool genannte Statuen (Bild oben), Säulen in Form von Atlanten, dem Windgott geweihte Rundbauten sowie der Kult der gefiederten Schlange.

Bisher konnte man die aus Tula stammenden Tolteken oder die Mixteken nicht für den Untergang der klassischen Mayazentren verantwortlich machen, denn gemäß der Standardchronologie war die Kultur der Maya bereits untergegangen, als sich diejenige der Tolteken (950 – 1200 n. Chr.) und Mixteken (ab 925 n. Chr.) entwickelte. Einige Mayaforscher wollen sogar den Ursprung von Tula in Chichén Itzá sehen, was allerdings durch eindeutige Vorläuferformen von typisch toltekischer Architektur und Skulptur widerlegt wird, die in der Zeit um 700 n. Chr. in der Nachbarschaft von Tula entstanden waren.

Unserer neuen Chronologie zufolge ging die Mayakultur indessen 208 Jahre später unter, was zeitlich zu den politischen Umwälzungen in Zentralmexiko und dem Aufstieg der Tolteken passt. Nach dieser neuen Mayachronologie begann die älteste Inschrift in Chichén Itzá im Jahr 1081 n. Chr.; die letzte Inschrift fiel dann in das Jahr 1206 n. Chr., was mit dem Ende der toltekischen Dominanz in Zentralmexiko übereinstimmt.

Die neue Chronologie würde auch das Auftreten von zentralmexikanischen Götternamen in der Venustafel des Dresdener Codex erklären. Obwohl diese Zusammenstellung der Venusdaten ursprünglich aus dem 9. Jahrhundert stammt, wurde der Codex bei späteren Abschriften ergänzt. Dies ist besonders deutlich an der Sonnentafel zu sehen, in der Kalenderdaten aus der Zeit zwischen 474 und 579 n. Chr. um zwei Zenitpassagen aus den Jahren 1157 und 1166 n. Chr. ergänzt wurden, die beide zur geografischen Breite von Chichén Itzá passen.

Möglicherweise ist die heutige Fassung des Dresdener Codex unter dem Sternenhimmel des als El Caracol bekannten Observatoriums in Chichén Itzá entstanden, als die Mayakultur bereits eine Symbiose mit der toltekischen Kultur eingegangen war. ◁

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ **Stilelemente an manchen Gebäuden in Chichén Itzá und die Chac Mool genannten Statuen halb liegender Krieger lassen eine Verbindung der Mayazentren mit der 1300 Kilometer entfernten Toltekenstadt Tula in Zentralmexiko vermuten.**

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Andreas Fuls ist am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technischen Universität Berlin als Vermessungsingenieur tätig. Seit 1985 gilt sein spezielles Interesse der Astronomie und der Chronologie der Mayakultur.

Die Maya. Von Jeremy A. Sabloff. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1991

The correlation of the modern western and ancient Maya calendars. Von B. Wells und A. Fuls. Early Sites Research Society, 2000

The Maya calendar correlation problem. Von D. H. Kelley in: Civilization in the ancient Americas. Hrsg. von R. M. Leventhal und A. L. Kolata. Harvard University und University of New Mexico, 1983

Skywatchers of ancient Mexico. Von A. F. Aveni. University of Texas Press, Austin 1980

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Das Rätsel der Chorea Huntington

Bereits vor zehn Jahren wurde das Gen für den erblichen Veitstanz dingfest gemacht. Doch erst jetzt beginnt man zu verstehen, wie es zu den verheerenden Schäden im Gehirn kommt.

Von Elena Cattaneo, Dorotea Rigamonti und Chiara Zuccato

Unkontrollierte Grimassen, gefolgt von Geistesabwesenheit sowie unwillkürlichen Zuckungen und Gesten sind meist die ersten verräterischen Anzeichen, mit denen sich die tödliche Erbkrankheit ankündigt. Zunächst besonders auffällig bei körperlicher und seelischer Belastung, verstärken sich die motorischen Symptome mit der Zeit zu den typischen tänzelnden oder torkelnden Bewegungen, die der Krankheit ihren deutschen Namen einbrachten: erblicher Veitstanz. Sie werden immer hinderlicher und machen selbst einfache, alltägliche Verrichtungen unmöglich. Auch die geistigen Fähigkeiten wie das Planungsvermögen leiden. In späteren Stadien sind Depression und Gewalttätigkeit zu beobachten, bei Schwerstkranken Demenz bis hin zu Wahnvorstellungen. So verfällt ein vormals vitaler Mensch im Laufe von meist 15 bis 20 Jahren zu einem ans Bett gefesselten Schatten seiner selbst und stirbt.

Zwar beeinträchtigt die schreckliche Krankheit in erster Linie das Gehirn; die Betroffenen sterben jedoch meist an Komplikationen bedingt durch ihre Schluck- und Atembeschwerden, ihre Bettlägerigkeit oder an den Folgen von Sturz bedingten Kopfverletzungen.

Der fachliche Name Chorea Huntington geht auf einen Arzt aus Ohio zurück. 1872 berichtete George Huntington ausführlich über eine merkwürdige erbliche Erkrankung, die er und sein Vater – ebenfalls Arzt – bei einer Familie auf Long Island im US-Bundesstaat New York verfolgt hatten. Groteske unkoordinierte Bewegungen waren auch für andere Krankheiten typisch. Huntington erkannte jedoch, dass die »Chorea« – nach griechisch *choros* für Tanz – in diesem Fall ein Erbleiden war.

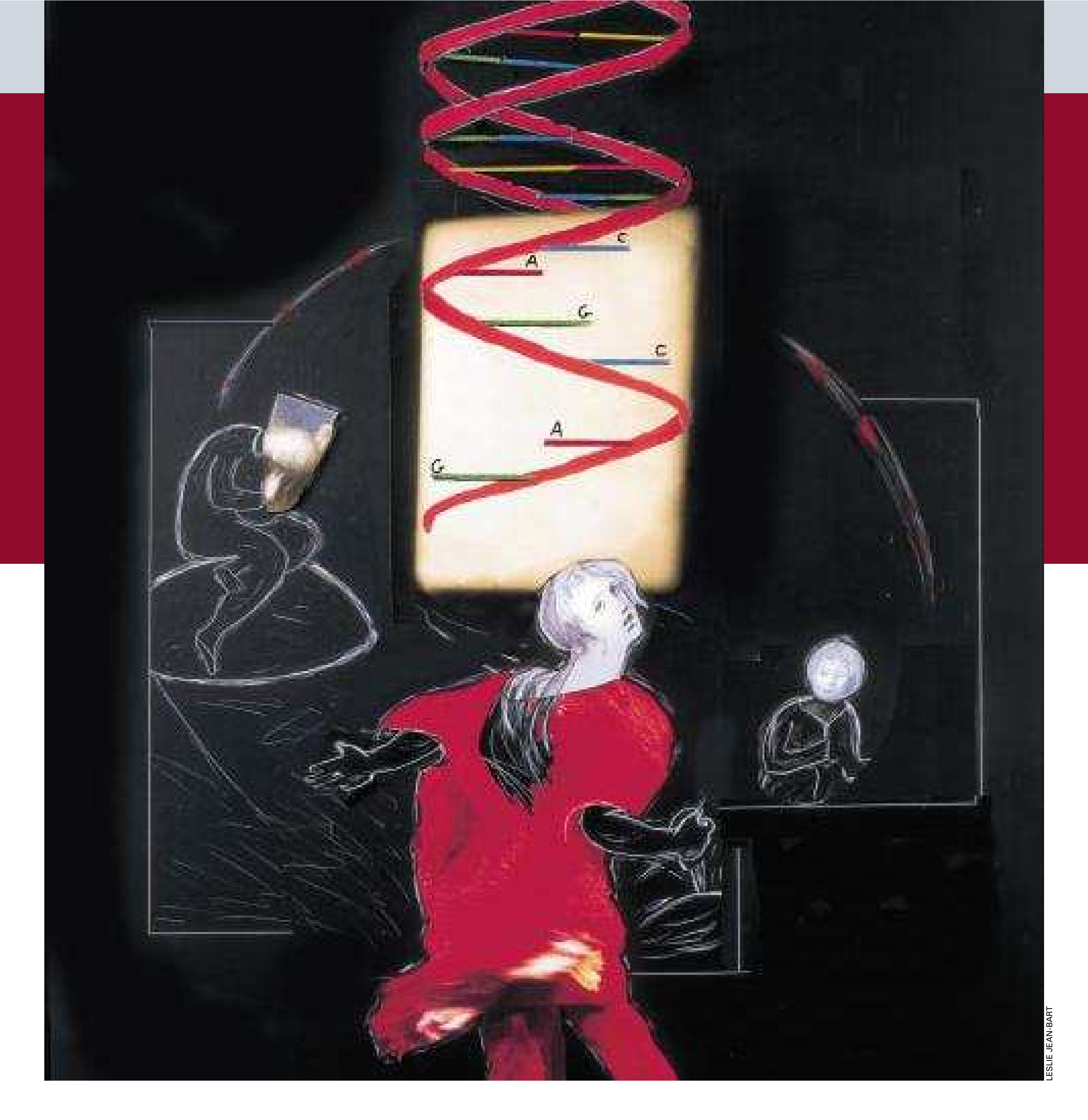
Teamwork: 58 Wissenschaftler entlarvten den Gendefekt

Längst weiß man, dass Chorea Huntington zu den häufigsten erblich bedingten Hirnstörungen gehört: Sie trifft etwa einen von 10 000 Menschen. Das verantwortliche Gen dingfest zu machen erwies sich als ausgesprochen schwierig. Dies gelang erst 1993 einer weltumspannenden Koalition aus 58 Wissenschaftlern – darunter Nancy Wexler von der Columbia-Universität in New York und James F. Gusella vom Massachusetts General Hospital in Charlestown. Schon bald darauf waren Tests verfügbar, mit deren Hilfe Blutsverwandte von Huntington-Patienten Gewissheit erhalten können, ob sie das mutierte Gen ebenfalls tragen oder nicht. Dieses Wissen kann bei der Lebensplanung helfen, denn die Krankheit wird dominant vererbt: Selbst wer nur ein defektes Gen trägt, wird erkranken – meist zwischen dem 30. und 50. Lebensjahr. Außerdem erben die Kinder die Veranlagung mit einer Wahrscheinlichkeit von fünfzig Prozent.

Manche Menschen verzichten jedoch auf den Test. Sie wollen lieber gar nicht wissen, ob ihnen das unabwendbare Schicksal bevorsteht – denn Chorea Huntington ist unheilbar. Noch immer fehlt eine wirkungsvolle Therapie, und die Mechanismen, die dem Krankheitsbild zu Grunde liegen und einen therapeutischen Angriffspunkt bieten könnten, sind erst teilweise verstanden. Forscher wie wir setzten aber mit ihrer Arbeit alles daran, Familien mit »Huntington« Hoffnung zu geben.

So haben wir inzwischen Indizien, dass sich der Gendefekt in zweifacher Weise schädlich auswirkt: Er lässt ein abnormes Protein entstehen, das einerseits für Nervenzellen offenbar Gift ist und andererseits die Produktion eines wichtigen Wachstumsfaktors nicht mehr anregt. Mit der Zeit verkümmert auffällig der Streifenkörper, ein Bereich innen in jeder Hirnhälfte, der durch seinen dämpfenden Einfluss zu wohl koordinierten Bewegungen beiträgt (Bild Seite 66). Sterben seine Neuronen ab, kann die motorische Aktivität der Hirnrinde nun regelrecht »überschießen« und die unfreiwilligen Bewegungen der Patienten auslösen. Das erklärt die körperlichen, weniger aber die psychischen Symptome der Erkrankung. Immerhin: Tierversuche sowie erste klinische Studien mit Patienten legen nun nahe, dass der Einsatz von Wachstumsfaktoren den schädlichen Effekten des abnormen Proteins entgegenwirken dürfte.

Das Gen, das bei der Chorea Huntington mutiert ist, liegt am Ende des kurzen Arms von Chromosom 4 und trägt die Bauanleitung für ein Protein namens »Huntingtin«. Bei näherer Un-



LESLIE JEAN-BART

Gewöhnlich bricht sie erst in der Mitte des Lebens aus und führt zu unwillkürlichen zuckenden Bewegungen, geistiger Behinderung sowie seelischer Qual: die Huntington-Krankheit. Ursache ist ein »Stotter-Gen«, in dem die genetische »Silbe« CAG zu oft wiederholt wird.

tersuchung des Gens fiel auf, dass es schon im Normalfall regelrecht stottert. Grundsätzlich ist die Erbinformation durch die Abfolge der vier Basen Adenin (A), Thymin (T), Cytosin (C) und Guanin (G) festgelegt. Dabei verschlüsseln je drei »Buchstaben« – ein Triplett – eine von zwanzig verschiedenen Aminosäuren, die Bausteine für jegliches Protein. Beim Huntingtin-Gen tritt, wie sich zeigte, die Dreierkombination CAG gleich mehrmals hintereinander auf: Selbst bei gesunden Menschen wiederholt sie sich neun- bis 35-mal, bei Huntington-Patienten im Extremfall sogar 250-mal. Zugleich besteht eine interessante Tendenz: Je länger die CAG-Strecke ist, desto früher im Leben bricht die Krankheit gewöhnlich aus. Aus bislang unbekannten Gründen kann die Zahl der CAG-Wiederholungen in betroffenen Familien von einer Generation zur andern ansteigen – vor allem, wenn das defekte Gen vom Vater vererbt wird. Interessanterweise gehen einige weitere neurodegenerative Erkrankungen ebenfalls mit solchen »Stottergenen« einher.

Die wiederholte »Silbe« CAG steht für die Aminosäure Glutamin. Demnach enthält das veränderte Protein einen Abschnitt mit mehr als 35 aufeinander folgenden Glutaminbausteinen. Wie aber kann überzähliges Glutamin in der Kette krank machen?

Die einfachste Erklärung wäre, dass das Huntingtin-Molekül durch den verlängerten Polyglutamin-Abschnitt unfähig wird, seine vorgesehene Aufgabe im Gehirn zu verrichten. Doch die Hypothese wurde schon früh verworfen. Das Huntingtin-Protein ließ sich nicht nur ▷

▷ im Streifenkörper nachweisen, der bei den Patienten verkümmert, sondern auch in anderen Hirnbereichen, die aber offensichtlich nicht direkt durch die Krankheit beeinträchtigt werden.

Außerdem enthält unser Erbgut von allen Genen, die nicht auf den Geschlechtschromosomen sitzen, zwei Exemplare: eines von der Mutter und eines vom Vater. Da Huntington-Kranke gewöhnlich neben der defekten auch eine intakte Variante des kritischen Gens besitzen, sollte noch immer eine gewisse Menge an normalem Protein gewährleistet sein. Analoges gibt es bei Kindern mit dem Wolf-Syndrom. Sie haben nur ein gesundes Exemplar des Gens, weil ihnen das andere mitsamt einer großen Region von Chromosom 4 völlig fehlt. Die wenigen dieser Patienten, die überhaupt länger leben, entwickeln jedoch keine Huntington-Symptome.

Gefährliche neue Eigenschaften

Ein mutiertes Protein kann freilich nicht nur seine eigentlichen Fähigkeiten einbüßen, sondern kann auch eine neue hinzugewinnen. Dabei handelt es sich weniger um physiologisch sinnvolle Eigenschaften als vielmehr um solche, die im Körper Unheil stiften, regelrecht toxisch wirken. Für das mutierte Huntingtin-Protein könnte dies bedeuten, dass es wegen des überlangen Polyglutamin-Bereichs seine Form verändert und dann an anderen Proteinen gleichsam haften bleibt – nicht zuletzt am normalen Gegenpart. Das wiederum könnte die gesunden Eiweißmoleküle bei der Erfüllung ihrer Aufgaben behindern. Ein derartiger Funktionsgewinn des veränderten Huntingtin würde auch erklären, warum sich die Krankheit dominant vererbt.

Und tatsächlich: Wie Max Perutz und seine Mitarbeiter am Labor für Molekularbiologie des Britischen Medizinischen Forschungsrats in Cambridge feststellten, bildet der Polyglutamin-Abschnitt des veränderten Huntingtins ein so genanntes Beta-Faltblatt. Eine solche Struktur kann bewirken, dass Proteine miteinander verbacken. Die Forschungsteams um Erich Wanker vom Max-Delbrück-Centrum in Berlin, Gill Bates vom Guys Hospital in London sowie Marian DiFiglia vom Massachusetts General Hospital in Boston verfolgten diesen Ansatz weiter: Sie fanden Zusammenballungen mit mutiertem Huntingtin im Gehirn von Mäusen, die das veränderte menschliche Gen trugen; ferner in Neuronen des Streifenkörpers, aber auch der Hirnrinde von verstorbenen Patienten.

Auf welche Weise die Aggregate Nervenzellen schädigen, ist jedoch sehr umstritten. Möglicherweise sind die Proteasomen – eine Art zellulärer Reißwolf für verbrauchte oder potenziell schädliche Proteine – nicht in der Lage, die mutierten, falsch gefalteten Huntingtin-Proteine zu beseitigen, sodass sich diese in den Zellen anhäufen und sie schließlich zum Absterben bringen. Aber auch diese Vorstellung erklärt nicht ohne weiteres, warum sich das Neuronensterben praktisch auf den Streifenkörper beschränkt.

Gegenhypothesen gehen davon aus, dass die Proteinaggregate selbst gar nicht die Übeltäter sind. Vielmehr könnten sie einen Schutzmechanismus darstellen: Durch die Zusammenlagerung würden die Polyglutamin-Abschnitte gleichsam in Sicherheitsverwahrung genommen, um Zellschäden zu begrenzen.

Herauszufinden, welche Rolle die Proteinklumpen spielen, ist entscheidend für das Verständnis der Krankheit. Sollte sich bewahrheiten, dass die Eiweißbrocken die Ursache allen Übels sind, könnte ein Ansatz für die Therapie darin bestehen, das Verklumpen zu unterbinden oder bestehende Aggregate aufzubrechen. Wanker und seine Mitarbeiter haben daher ein Verfahren entwickelt, mit dem sie gezielt nach Wirkstoffen suchen, die das mutierte Huntingtin am Verklumpen hindern (siehe Kasten Seite 64/65).

Zellulärer Lebensretter

Eine andere Richtung der Huntington-Forschung verfolgt die Frage, warum das veränderte Protein speziell Nervenzellen im Streifenkörper schädigt. Eine mögliche Antwort könnte in Proteinen liegen, die nur in diesem Teil des Gehirns vorkommen und die mit Huntingtin in Wechselwirkung treten. Eingefangen in den Aggregaten, könnten sie theoretisch zu deren Schädlichkeit beitragen. Unter den drei bislang bekannten Gruppen von Proteinen, die mit Huntingtin interagieren, kam keines in Frage. Denn wie es aussieht, sind diese Eiweißmoleküle weder für die schädlichen Eigenschaften des mutierten Huntingtins verantwortlich noch erklären sie, warum ausgerechnet Neuronen im Streifenkörper sterben.

Auf der Suche nach des Rätsels Lösung haben wir und andere Forscher – darunter Scott Zeitlin an der Columbia-Universität in New York – uns gefragt, worin eigentlich die Aufgabe des gesunden Proteins im Gehirn besteht. Dazu statteten wir Nervenzellen auf gentechnischem Wege mit zusätzlichen Exemplaren des Huntingtin-Gens aus – entweder der normalen oder der mutierte Variante. Diese manipulierten Neuronen kultivierten wir dann unter speziellen Bedingungen, die im Allgemeinen ihren Untergang bedeuten würden, weil etwa im Kulturmedium Wachstumssignale fehlen. Doch wir machten eine verblüffende Beobachtung: Enthielten die Zellen mehr als die übliche Menge an gesundem Huntingtin, so überlebten sie. Ferner fanden wir heraus, dass das funktionstüchtige Protein offenbar den Ablauf molekularer Ereignisse unterbricht, die in das Selbstmordprogramm der Zelle, die Apoptose, münden. Demnach fungiert es – so folgerten wir – als eine Art Lebensretterprotein in Nervenzellen.

Zeitlin und seine Kollegen gingen noch einen Schritt weiter. Sie züchteten

IN KÜRZE

▶ Die Huntington-Krankheit, fachlich Chorea Huntington oder im Deutschen früher **erblicher Veitstanz** genannt, ist eine genetisch bedingte Erkrankung, die zunächst gesund erscheinende Betroffene später motorisch, geistig und psychisch stark behindert.

▶ Wer das kritisch veränderte Gen geerbt hat, was ein **Gentest** nachweist, wird den Ausbruch meist im mittleren Alter erleben – ohne Aussicht auf Heilung.

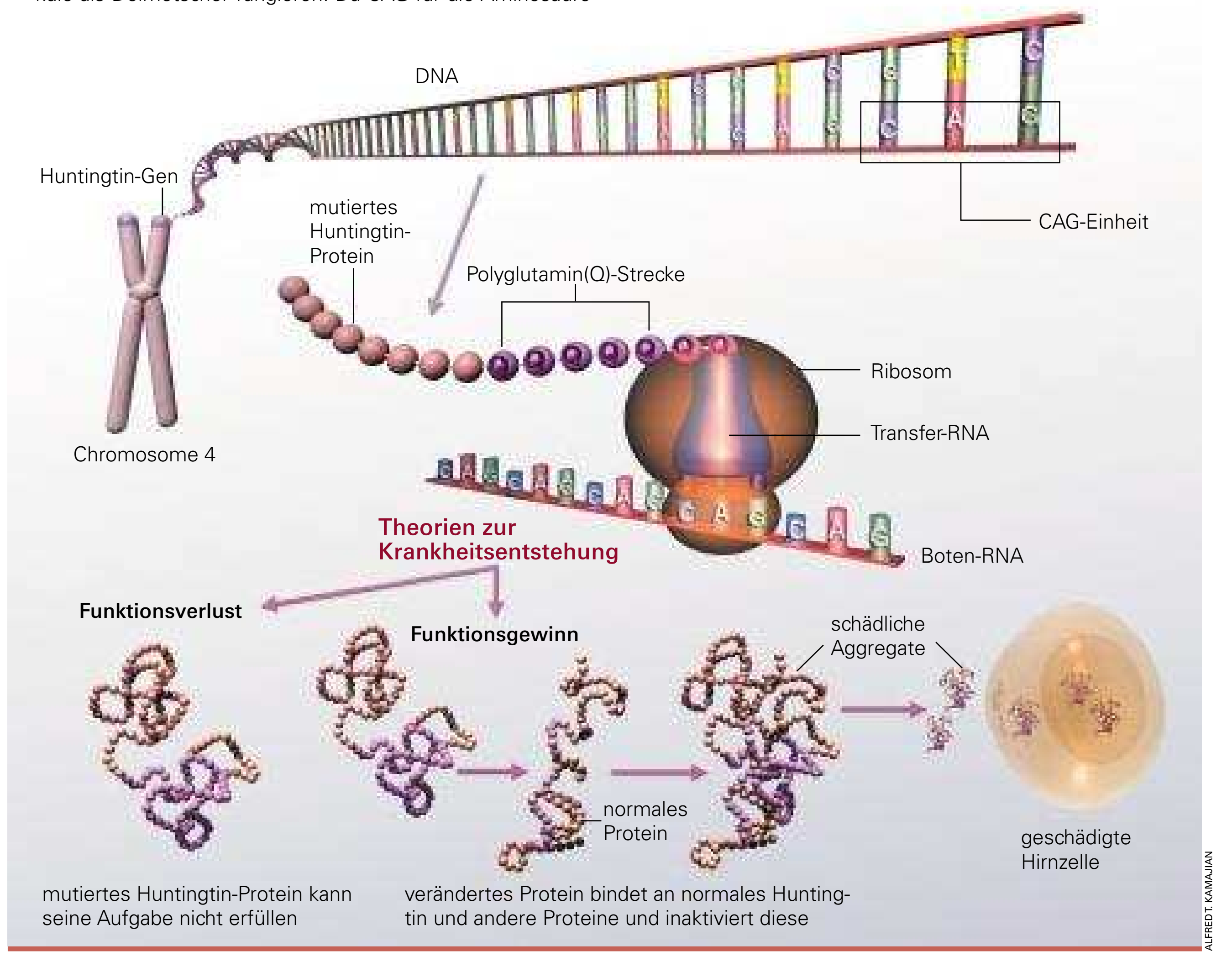
▶ Ursache ist eine **Mutation im Chromosom 4**, die das Gen für das Protein Huntingtin an einer bestimmten Stelle der Bauanweisung übermäßig ins **Stottern** bringt. Dadurch wird bei diesem Protein die Aminosäure Glutamin mindestens 36-mal hintereinander eingebaut.

▶ **Das verlängerte Eiweißmolekül** schädigt offenbar bestimmte Hirnzellen und hat zudem die Fähigkeit verloren, ein wichtiges Gen für einen **Nervenwachstumsfaktor** zu aktivieren.

Wie genetisches Stottern schaden kann

Forscher verfolgen verschiedene Theorien, wie die typischen Hirnschäden bei der Chorea Huntington entstehen. Das verantwortliche Gen – es liegt auf Chromosom 4 – enthält normalerweise 9 bis 35 Wiederholungen einer Dreiergruppe aus den DNA-Basen Cytosin, Adenin und Guanin, kurz CAG. Bei Huntington-Patienten folgen dagegen gewöhnlich zwischen vierzig und sechzig CAGs aufeinander. Die Zellmaschinerie erstellt von dem so genannten Huntingtin-Gen zunächst eine Art Abschrift; diese Boten-RNA geht an die Ribosomen, die Proteinfabriken der Zelle. Dort wird die Bauanweisung gemäß dem genetischen Code übersetzt, wobei spezielle Moleküle als Dolmetscher fungieren. Da CAG für die Aminosäure Glutamin steht (fachlich durch den Buchstaben Q gekennzeichnet), enthält das mutierte Huntingtin-Protein eine zu lange Polyglutamin-Strecke.

Die gewachsene Stotterstrecke könnte das Protein entweder funktionsunfähig machen (links unten) oder ihm neue, aber unerwünschte Eigenschaften verleihen (Mitte). Tatsächlich verklumpt das veränderte Molekül mit seinen normalen Gegenstücken oder anderen Proteinen, inaktiviert sie. Solche Aggregate schädigen anscheinend Hirnzellen direkt (rechts). Schuld an der Erkrankung ist möglicherweise auch eine Kombination all dieser Mechanismen.



so genannte konditionelle Knock-out-Mäuse, also Tiere, bei denen sich beide Exemplare des normalen Huntingtin-Gens nachträglich gezielt ausschalten lassen. Wenn ausgereifte Mäuse gezwungenermaßen die Produktion des Proteins einstellen, entwickelten sie schwere Hirnschäden und ganz ähnliche neurologische Symptome wie Tiere, die das mutierte Protein erzeugten. Unterbrach das Team die Produktion zu verschiedenen Zeitpunkten im Leben der Mäuse, führte dies stets zum Selbstmord von Hirnneuronen. Diese Beobachtung legt nahe, dass das Fehlen des normalen und die Gegenwart des mutierten Huntingtins möglicherweise nur zwei Seiten ein und derselben Medaille sind.

So aufschlussreich die Experimente waren, sie lieferten keine Erklärung dafür, warum bei Huntington-Patienten vor allem Zellen im Streifenkörper absterben. Daher wandten wir und andere Forscher uns einem Protein mit dem Kürzel BDNF zu (*brain-derived neurotrophic factor*; vom Gehirn stammender neurotropher Faktor). Es handelt sich ▷

▷ um einen Wachstumsfaktor, der bekanntermaßen die Entwicklung und das Überleben von Nervenzellen im Streifenkörper fördert. Normalerweise entsteht die Substanz in den Zellkörpern von Neuronen der Hirnrinde und erreicht ihr Ziel über Nervenbahnen, die beide Hirnregionen miteinander verbinden.

Bei der Suche nach einer möglichen Beziehung zwischen Huntingtin und BDNF erhielten wir ein überraschendes Ergebnis: Normales Huntingtin steigerte die Produktion des Wachstumsfaktors in Nervenzellkulturen. Es aktivierte offenbar den so genannten Promotor – den Einschaltregler – des BDNF-Gens, sodass die Zellmaschinerie dieses häufiger abliest und mehr von dem Wachstumsfaktor erzeugt. Anders mutiertes Huntingtin: Es stimulierte den Promotor nicht und die BDNF-Produktion sank.

Dieses Zusammenspiel, das wir zunächst in Zellkulturen beobachtet hatten, konnten wir auch an genetisch veränderten Mäusen bestätigen, die Michael Hayden und seine Kollegen an der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada) gezüchtet hatten. Tiere, die normales Huntingtin überproduzierten, wiesen eine erhöhte Menge an BDNF im Gehirn auf – nicht so Mäuse, die mutiertes Huntingtin herstellen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse gehen wir mittlerweile davon aus, dass die Huntington-Krankheit eine sehr komplexe Störung ist, die sich nicht ohne weiteres in unsere früheren Hypothesen einfügt. Die Mutation im Huntingtin-Gen lässt nicht nur toxische Protein-Aggregate entstehen, die direkt Hirnzellen töten können. Sie führt auch zu einer Verarmung des Gehirns an normalem Huntingtin – und damit indirekt zu einer geringeren Produktion des wichtigen Wachstumsfaktors BDNF. Möglicherweise sind beide Mechanismen sogar miteinander verknüpft. Denn 1999 entdeckten Robert Friedländer von der Brigham- und Frauenklinik in Boston und sein Team bei genetisch veränderten Mäusen, dass die mutierte Form des Huntingtins die normale Version zu zerstören vermag.

Die tieferen Einsichten in die Komplexität der Chorea Huntington liefern uns das Rüstzeug, um letztlich bessere Therapien zu entwickeln. Die derzeit er-

Huntington-Forschung in Deutschland

Großfahndung nach Hemmstoffen

In Deutschland arbeiten verschiedene wissenschaftliche Institutionen intensiv daran, die Krankheitsmechanismen aufzuklären und ein Medikament zu entwickeln. Wie nahe sind sie dem Ziel?

Von Erich Wanker und Sigrid Schnögl

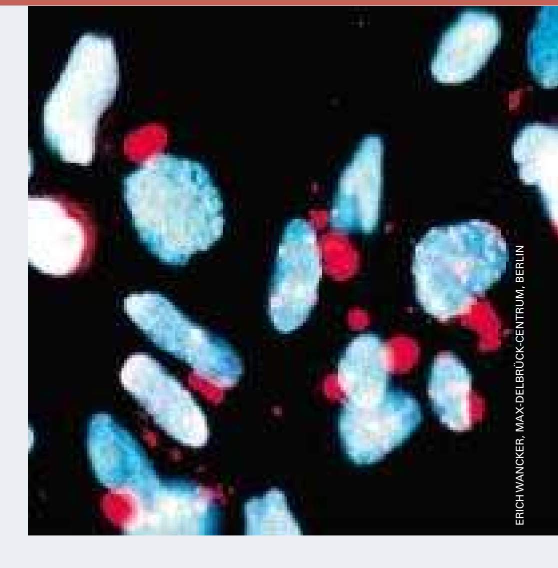
Die genetische Ursache für Chorea Huntington liegt in einem stotternden Gen: Das DNA-Motiv CAG, das genetische »Wort« für die Aminosäure Glutamin, wiederholt sich dort selbst bei gesunden Menschen mehrfach. Sind es jedoch mehr als 40-mal, wird der Betroffene unausweichlich erkranken. Demnach steht das Erbleiden im Zusammenhang mit einer überlangen Glutaminserie im zugehörigen Protein – die Frage ist nur wie.

Den ersten Hinweis auf einen möglichen Mechanismus lieferte der Nobelpreisträger Max Perutz. Er postulierte, das Huntingtin getaufte Protein sei durch den überlangen Polyglutamin-Abschnitt in seiner Faltstruktur verändert – und zwar derart, dass die mutierten Eiweißmoleküle untereinander verklumpen können.

Dieser Idee wollten meine Mitarbeiter und ich auf den Grund gehen. Wir stellten Huntingtin-Proteine mit variablen Polyglutamin-Strecken her und untersuchten ihr Verhalten. Tatsächlich: Ab einer Länge von etwa vierzig Glutaminen ballten sich die Eiweißmoleküle zusammen. Was zunächst im Reagenzglas gelang, konnten wir kurz danach – gemeinsam mit unserer Kollegin Gill Bates in London – an Tieren bestätigen: Mäuse mit einem mutierten menschlichen Huntington-Gen entwickelten im Gehirn unlösliche Aggregate aus faserartigen Proteinstrukturen. Einen weiteren Beleg lieferte Marian DiFiglia in Boston. Sie wies die verdächtigen Aggregate auch bei menschlichen Patienten nach. Ähnliche Verklumpungen, aber aus anderen Proteinen, finden sich übrigens bei einer Reihe von Erkrankungen, darunter Alzheimer und BSE.

Proteinbrocken auf der Spur

Wir waren überzeugt, in den Klumpen eine wesentliche Ursache des Krankheitsgeschehens bei Chorea Huntington identifiziert zu haben. Wie aber entstanden sie? Mit einer eigens entwickelten Methode konnten wir beobachten, dass die Aggregation des mutierten Huntingtins mit winzigen Proteinkeimen beginnt, die sich umso schneller bilden, je länger die Glutaminstrecke ist. Aus den Keimen entstehen dann durch Polymerisation Fasern, die sich wiederum zusammenlagern und andere Proteine dabei einschließen. Letztlich versagen die betroffenen Zellen beim Beseitigen der Brocken und sterben – so unsere These seit 1997.


ERICH WANCKER, MAX-DELBRÜCK-CENTRUM, BERLIN

Ob die Proteinklumpen tatsächlich den Untergang der Nervenzellen bei der Huntington-Krankheit zu verantworten haben, ist immer noch nicht restlos geklärt. Dafür sprechen jedoch die Ergebnisse weiterer Untersuchungen. Zunächst fanden wir in einer chemischen Verbindung namens Kongorot ein Mittel, um das Verklumpen der Polyglutamin-Abschnitte zu hemmen – sowohl bei isoliertem Protein im Reagenzglas als auch in Zellkulturen. Dadurch sank auch die Toxizität, wie wir mit Hilfe einer zelleigenen Indikatorsubstanz beobachteten.

Diesen Ansatz führten Forscher um Ivelisse Sanchez weiter. Wie das Team an der medizinische Fakultät der Harvard Universität in Cambridge (Massachusetts) he-

hältlichen Medikamente mildern lediglich manche der Symptome und haben mitunter starke Nebenwirkungen oder verschlimmern andere Krankheitserscheinungen. So gibt es bestimmte Beruhigungsmittel, die unfreiwillige Bewegungen unterdrücken helfen. Sie senken jedoch die Konzentration des Nervenbotenstoffes Dopamin im Gehirn und verstärken dadurch die depressiven Symptome. Umgekehrt hebt der Einsatz von Antidepressiva zwar die Stimmung der Betroffenen, doch können manche Präparatetypen die Chorea fördern. Gegen Halluzinationen und Psychosen erhalten die Patienten Neuroleptika, es besteht allerdings die Gefahr, dass die Medikamente bei höherer Dosierung spastische Bewegungen auslösen. Seit einigen Jahren erprobt man in den USA und in Europa die Substanz Riluzol. Wie sie genau wirkt ist unbekannt. Sie wird aber bereits bei einer anderen neurologischen Störung eingesetzt, der Amyotrophen Lateralsklerose, an der beispielsweise der Astrophysiker Stephen Hawking leidet. Doch wie bei dieser Erkrankung zeigt der Wirkstoff auch bei Chorea Huntington nur begrenzt Erfolg.

Viel versprechende Therapieansätze

Neuere Behandlungsstrategien zielen darauf ab, die zerstörten Neuronen durch transplantiertes fetales Nervengewebe zu ersetzen oder neurotrophe Wachstumsfaktoren wie BDNF in das Gehirn einzubringen. Erste Transplantationsversuche bei Patienten in einem Frühstadium der Krankheit zeigen viel versprechende, allerdings nur vorläufige Ergebnisse. So verpflanzte ein Team um Marc Peschanski an der Universitätsklinik in Créteil, Paris, fetale Neuronen in den Streifenkörper von fünf Huntington-Patienten. Bei dreien besserten sich anschließend die motorischen und intellektuellen Fähigkeiten merklich. Derzeit laufen klinische Studien mit einer größeren Anzahl von Patienten. Hirngewebe aus abgetriebenen Feten ist freilich nur begrenzt verfügbar und seine medizinische Verwendung zudem ethisch äußerst umstritten. Als Alternative versuchen Forscher daher, neuronale Stammzellen für Transplantationszwecke im Labor zu züchten. Offen ist jedoch, ob die unreifen Zellen sich im Gehirn eines Patien- ▷

◁ **Unlösliche Aggregate aus mutiertem Huntingtin – in der Fluoreszenzaufnahme rot gefärbt – lagern sich an bläulich schimmernde Zellkerne an.**

rausfand, bremst Kongorot auch bei den genveränderten Mäusen den Krankheitsverlauf. Damit war ein wichtiges Angriffsziel für die Behandlung der menschlichen Huntington-Krankheit ermittelt: Zwar ist Kongorot selbst zu toxisch und daher als Medikament ungeeignet, doch zeigte es prinzipiell, dass sich durch gezieltes Hemmen der Aggregation der Schaden im Gehirn begrenzen lässt.

Parallel zu diesen Experimenten verfolgten wir – gemeinsam mit Ulrich Hartl und seiner Gruppe am Max-Planck-Institut für Biochemie in München – noch eine zweite Strategie. Hier spielten so genannte Hitzeschockproteine die Hauptrolle. Diese speziellen Eiweißmoleküle sorgen in der Zelle für die korrekte Faltung von Proteinen und verhindern dadurch die Bildung unlöslicher Aggregate. Im Falle des Huntingtins verhinderten sie zwar nicht das Verklumpen, veränderten aber die Brocken immerhin so, dass sie weniger toxisch wirkten. Dies beobachteten auch Nancy Bonini und ihr Team an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia mit Hilfe genetisch veränderter Taufliegen. Die Tiere bilden das mutierte menschliche Huntingtin in einem Auge, wodurch die Schäden leicht erkennbar werden. Diese ließen sich mit Hilfe der Hitzeschockproteine weitgehend rückgängig machen. Leider ist es kaum praktikabel, die hilfreichen Proteine von außen in die Neuronen im menschlichen Gehirn zu manövrieren. Denkbar ist jedoch, ihre Produktion durch geeignete Wirkstoffe anzuregen. Dies gelang uns bei Zellkulturen und später Bonini bei der Taufliege mit dem Antibiotikum Geldamycin. Die Substanz ist jedoch beim Menschen nicht »gehirngängig«.

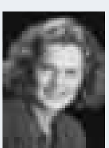
Aggregationsbremsen auch gegen Alzheimer?

Mit diesen beiden Forschungsansätzen – der direkten Hemmung der Aggregation und der indirekten über die Hitzeschockreaktion – hatten wir zwei mögliche Therapiewege für Chorea Huntington eröffnet. Nun ging es an die Suche nach geeigneten niedermolekularen Wirkstoffen – klein müssen sie sein, damit sie leichter die so genannte Blut-Hirn-Schranke passieren. Unter gut 180 000 chemischen Substanzen, die uns das Pharmaunternehmen Merck in Darmstadt zur Verfügung stellte, identifizierten wir mit Hilfe unseres dafür abgewandelten Aggregationstests 300 potenzielle Aggregationshemmer. Die engere Wahl fiel auf etwa 25 Benzothiazole. Aus dieser Stoffklasse sind bereits verschiedene Medikamente hervorgegangen, darunter das Riluzol, das mittlerweile gegen Amyotrophe Lateralsklerose eingesetzt und zur Zeit als Therapeutikum gegen Chorea Huntington getestet wird.

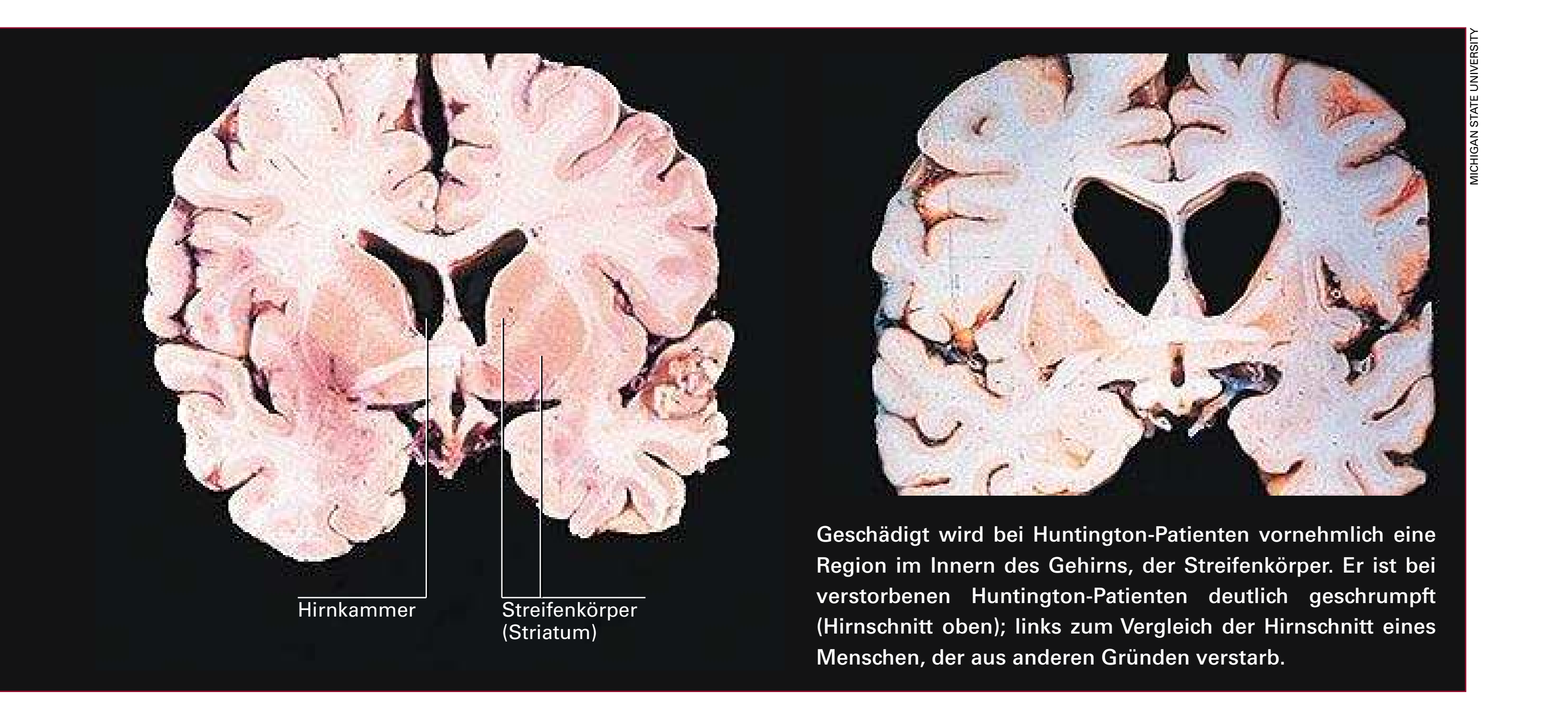
In weiteren Untersuchungen verengte sich der Kreis auf wenige Kandidaten, deren inhibierende Wirkung sich sowohl in Zellkultur als auch bei ersten einfachen Testorganismen wie dem Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* zeigte. Derzeit untersuchen wir die Wirksamkeit der Substanzen bei Mäusen mit dem Chorea-Huntington-Gen. Außerdem bereiten wir – zusammen mit Bernhard Landwehmayer in Ulm – die erste Patienten-Studie mit dem vielversprechendsten Wirkstoff vor. Nach jüngsten Erkenntnissen bremsen unsere Benzothiazole übrigens auch die Aggregation des für Alzheimer typischen Beta-Amyloids.

In Deutschland arbeiten viele Forschergruppen am Problem der Huntington-Chorea, und zwar stark vernetzt mit Kollegen in Europa und anderswo. Sie werden ideell und finanziell durch eine Reihe von Patientenverbänden, Stiftungen und Födereinrichtungen unterstützt. Das große Ziel, eine wirksame Therapie für das Leiden zu finden, ist zwar noch nicht erreicht, doch schon deutlich näher gerückt.

AUTOREN

Professor Erich Wanker leitet die Gruppe Neuroproteomforschung am Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin-Buch. Sigrid Schnögl ist freie Autorin auf dem biomedizinischen Sektor.



Geschädigt wird bei Huntington-Patienten vornehmlich eine Region im Innern des Gehirns, der Streifenkörper. Er ist bei verstorbenen Huntington-Patienten deutlich geschrumpft (Hirnschnitt oben); links zum Vergleich der Hirnschnitt eines Menschen, der aus anderen Gründen verstarb.

▷ ten weiterentwickeln und voll integrieren können. Ebenso unklar ist, wieweit krankmachendes Huntingtin, das ja von den angestammten Neuronen nach wie vor produziert wird, die erhoffte heilende Wirkung der normalen Version aus Spenderzellen zunichte macht.

Neuronenwachstum ankurbeln

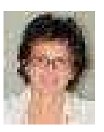
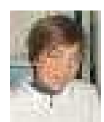
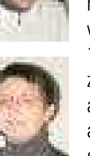
Der zweite Ansatz basiert auf einem Wachstumsfaktor namens CNTF (ciliar-neurotropher Faktor). Schon vor Jahren – noch bevor die segensreiche Wirkung von BDNF bekannt wurde – stellten Wissenschaftler bei Tieren fest, dass die Substanz Zellen des Streifenkörpers vor dem Untergang bewahren kann. Daher hat CNTF als Erster die klinische Erprobungsphase erreicht. Behandlungsversuche mit BDNF sind geplant, wenn die Tests an Tieren günstig ausfallen. Allerdings ist es schwierig, die Wachstumsfaktoren in ausreichender Menge und aktiver Form in betroffene Hirnregionen zu schleusen. Oral verabreicht werden die Proteine im Magen-Darm-Trakt schlichtweg verdaut und verlieren ihre Wirkung. Injektion oder Infusion in den Blutkreislauf ist ebenfalls keine optimale Lösung, da die Moleküle kaum die Blut-Hirn-Schranke passieren können. Diese zelluläre Barriere schirmt das Gehirn vor vielen im Blut zirkulierenden Stoffen ab.

Als mögliche Lösung hat die Gruppe um Patrick Aebischer an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne ein Gentherapie-Konzept entwickelt, das mit hauchdünnen, halbdurchlässigen Kapseln arbeitet. Darin eingeschlossen sind genetisch veränderte Zellen, die kontinuierlich CNTF abgeben. Eingesetzt in eine Hirnkammer, soll die Kapsel bedürftige Hirnzellen mit dem therapeutischen Produkt versorgen. Nach Erfolg versprechenden Vorversuchen an Schimpansen hat sich Aebischers Team mit den französischen Wissenschaftlern um Peschanski zusammengetan, um die Strategie an einer kleinen Zahl von Patienten zu erproben.

Ein weiteres Angriffsziel für künftige Medikamente gegen Chorea Huntington könnte der Promotor des BDNF-Gens bieten. Die Idee ist, einen Wirkstoff zu finden, der die normale Funktion von Huntingtin – das BDNF-Gen zu aktivieren – übernimmt. Er könnte somit dieses Problem der Mutation umgehen. Da eine solche Substanz erst nachgeschaltet zu Huntingtin wirkt, dürfte sie ihren Zweck unabhängig davon erfüllen, ob die gesunden Moleküle des Patienten mit den kranken verklumpen.

Nach unserer Sicht liegt die Zukunft der pharmakologischen Therapie gegen den erblichen Veitstanz in Wirkstoffen, die den vom mutierten Huntingtin ausgelösten Schadensablauf unterbrechen und zugleich die günstigsten Effekte des normalen Proteins imitieren. Je weiter wir die verwickelten Ursachen der Huntington-Krankheit entwirren, desto mehr therapeutische Angriffspunkte dürften wir finden – und werden so vielleicht in der Lage sein, schon der nächsten Patienten-Generation Hoffnung zu geben. ◁

AUTORINNEN UND LITERATURHINWEISE

Elena Cattaneo ist Professorin für pharmazeutische Biotechnik am Pharmakologischen Institut und am Sonderforschungszentrum für neurodegenerative Erkrankungen der Universität Mailand. Ihr Interesse gilt auch der möglichen Nutzung von Stammzellen für die Therapie neurodegenerativer Erkrankungen wie der Chorea Huntington. Seit 1995 gehört die mehrfach ausgezeichnete Wissenschaftlerin unter anderem der Coalition for a Cure an, einem internationalen Forschungskonsortium, gefördert von der Huntington-Gesellschaft der USA. **Dorotea Rigamonti** und **Chiara Zuccato** sind wissenschaftliche Mitarbeiterinnen in Cattaneos Labor. Beide erhielten ihren Doktortitel 2000, Erstere an der Universität Mailand, Letztere an der Universität von Insubrien in Varese.

Morbus Huntington – Klinik, Diagnose und Therapie. Von Herwig W. Lange in: psycho, Bd. 28 (2002), S. 479

Loss of Huntingtin-mediated BDNF gene transcription in Huntington's Disease. Von Chiara Zuccato et al. in: Science, Bd. 293 (2001), S. 493

Loss of normal Huntingtin function: new developments in Huntington's Disease research. Von Elena Cattaneo et al. in: Trends in Neurosciences, Bd. 24 (2001), S. 182

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

HTE AG

Katalysator im Heuhaufen

Hochdurchsatzchemie beschleunigt Suche.

Von Norbert Aschenbrenner

Davon träumen Unternehmer auch heute noch: Anfang des vorigen Jahrhunderts gelang dem Chemiker Alwin Mittasch (1860–1953) die optimale Rezeptur eines Eisen-Katalysators für die erste großtechnische Synthese von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff; die ist immer noch ein wichtiges Standbein des Auftraggebers Badische Anilin-& Soda-Fabrik, heute BASF. Katalysatoren beschleunigen chemische Prozesse, indem sie einen Reaktionspfad anbieten, der durch Zwischenschritte energetisch günstiger ist als der direkte Weg. Der Katalysator geht dabei vorübergehend eine Verbindung mit einem Reaktionspartner ein, steht aber am Ende der Gesamtreaktion wieder zur Verfügung.

Oft sind nur geringe Mengen dieser speziellen Substanzen erforderlich, um eine Synthese schnell und kostengünstig durchzuführen, aber diese Menge ist mitunter entscheidend. Dementsprechend ist die Suche nach maßgeschneiderten Katalysatoren ein wichtiger Punkt bei der Entwicklung oder Optimierung chemischer Prozesse. Nahezu alle Elemente des Periodensystems und deren Kombinationen stehen dabei zur Verfügung. Zunehmend beauftragen Ölkonzerne sowie Unternehmen für Fein-, Spezial- und Grundchemikalien kleinere Hightech-Firmen wie die Heidelberger HTE AG mit der Entwicklung neuer Katalysatoren oder der Optimierung von Prozessen.

Automaten testen Verbindungen

Insbesondere die so genannte Hochdurchsatzforschung (*high throughput experimentation*, HTE) beziehungsweise die Kombinatorische Chemie hilft den Forschern, sehr schnell umfangreiche Bibliotheken chemischer Verbindungen anzulegen. Pipettierroboter oder Automaten mischen definierte Mengen an Grundstoffen, das Ergebnis sind bis zu zehntausend Kombinationen gleichzeitig, die im Parallelbetrieb auf ihre Wirksamkeit getestet werden. Während Alwin Mittasch vielleicht 200 Verbindungen pro Versuchsanlage und Jahr prüfen konnte, bewältigt das Heidelberger Unternehmen diese Zahl an einem Tag.

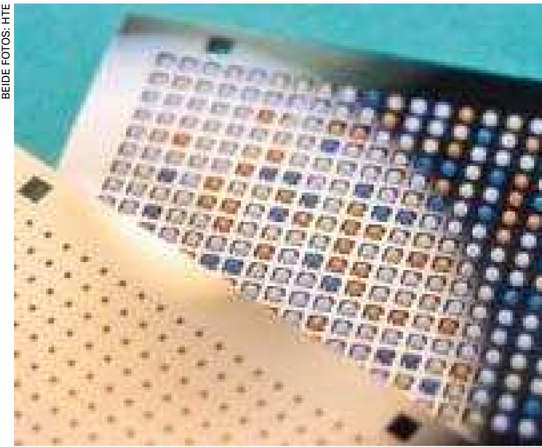
Ein weiterer Vorteil ist laut Vorstandssprecher Dirk Demuth: »Mit Kombinatorik können wir auch exotische Verbindungen testen, die bei der herkömmlichen Forschung wohl unter den Tisch fallen würden.« Katalysatoren erzeugen die HTE-Wissenschaftler unter anderem mit ihrem zum Patent angemeldeten *split and pool*-Verfahren: Die Forscher teilen einige tausend Aluminiumoxid-Kügelchen mit einem Durchmesser von etwa einem Millimeter in fünf gleiche Portionen. Jeden Teil tränken sie mit einer anderen Salzlösung beispielsweise der Metalle Kobalt, Molybdän, Eisen, Mangan und Vanadium. Die HTE-Forscher vereinen alle Kügelchen, teilen sie erneut in Portionen auf und tränken sie wieder in den Lösungen – insgesamt fünf Mal. Die nun auf der Oberfläche entstandenen Metallsalze unterscheiden sich statistisch verteilt in ihrer Zusammensetzung. Abschließend werden sie noch oxidiert, dann sind die Kugeln bereit für den Test auf katalytische Aktivität.

Zur schnellen Untersuchung können in einem Silizium-Wafer bis zu 384 Kügelchen während einer Reaktion beobachtet werden. Die rechteckigen Wafer haben isolierte Hohlräume, die jeweils eines davon aufnehmen. Durch Kanäle strömen Gase oder Flüssigkeiten. Über einen winzigen Einlass kommt jedes Kügelchen in Kontakt mit den Ausgangsstoffen und bewirkt eine Reaktion – oder auch

▼ Materialproben verschiedener Katalysatoren. Die HTE-Forscher pressen ihre Proben in verschiedene Formen – je nach Reaktortyp und Reaktion, für die sie vorgesehen sind.



BEIDE FOTOS: HTE



▲ In einem Mikroreaktor liegen Katalysatorkügelchen zufällig verteilt nebeneinander. Im Parallelbetrieb wird jedes getestet, ob es bei einer bestimmten Reaktion den Umsatz erhöht. Erweist es sich als wirksam, ermitteln die HTE-Forscher die exakte Zusammensetzung.

Wertvolle Antreiber

Ein Katalysator ist ein Stoff, der eine mögliche Reaktion hervorruft, ihre Geschwindigkeit verändert oder sie in eine bestimmte Richtung lenken kann, der jedoch unverändert aus der Reaktion hervorgeht. So lautet die nüchterne Definition von Stoffen, ohne die in der chemischen Industrie nichts laufen würde: Mit Katalysatoren – meist metallhaltigen Verbindungen – werden heute neunzig Prozent der chemischen Produkte hergestellt. Der Weltmarkt für Katalysatoren betrug 2001 rund 10 Milliarden Dollar, 2007 sollen es knapp 13 Milliarden Dollar sein. Der Wert der Produkte übersteigt dabei den Wert der Katalysatoren um ein Vielfaches. Allein die deutschen Chemieunternehmen setzen pro Jahr rund 130 Milliarden Euro um. Das größte Einsatzgebiet von Katalysatoren ist der Umweltsektor. Ob Pkw, Lastwagen oder Industrieanlage, mit katalytischen Verfahren werden Schadstoffe wie Kohlenmonoxid, Stickoxide oder Schwefeloxide zu harmlosen Substanzen umgewandelt. Auch die Erdölindustrie ist stark von Katalysatoren abhängig. Ohne diese würde es die modernen Kunststoffe nicht geben; nur die Vielfalt an Katalysatoren ermöglicht es den Entwicklern, immer neue Polymere herzustellen.

nicht. Ein Roboter nimmt über eine Sonde automatisch Proben aus den Hohlräumen. Daher wissen die Chemiker, welcher Katalysator an welcher Position auf dem Wafer wie gut funktioniert. Nur Erfolg versprechende Kandidaten werden dann hinsichtlich der Zusammensetzung ihrer Metallmischung untersucht.

Es gilt stets, die optimale Kombination aus Ausbeute und Selektivität zu erzielen, wobei neben der chemischen Zusammensetzung auch Faktoren wie Temperatur- und Druckverlauf eine entscheidende Rolle spielen. Daraus resultieren enorme Datenmengen, die neuronale Netze untersuchen, um die günstigste Kombination für den kompletten Prozess zu ermitteln. Für einen ihrer Kunden testeten die HTE-Forscher in einem Jahr rund 15 000 Verbindungen in 150 000 Versuchen mit verschiedenen Varianten von Ausgangsstoffen, Temperaturen und Drucken. Im Endeffekt verbesserte das Ergebnis die Ausbeute des Kunden von 5 auf rund 45 Prozent.

Ein anderer Typ von Reaktoren, in dem die Katalysatoren als Kugeln, Pellets oder in anderer Form eingesetzt werden, kommt den Verhältnissen technischer Großanlagen näher als die Silizium-Wafer. Denn das Übertragen einer Entwicklung aus dem Labor auf die Produktionsmaschinen kostet Chemieunternehmen viel Zeit und schmälert damit indirekt den Umsatz: Oft dauert es acht bis zwölf Jahre, bis ein neuer Produktionsprozess eingerichtet ist. Die HTE-Technik soll dementsprechend nicht nur Kosten in der Forschung und für Pilotanlagen sparen, sondern auch die Markteinführung von Produkten beschleunigen. Verschiedene Aufträge wurden erfolgreich abgeschlossen, einige davon brachten sogar Patentanmeldungen.

Neben der Auftragsforschung verfolgt HTE seit seiner Gründung im Jahr 1999 auch eigene Projekte. Am weitesten gediehen ist ein Katalysator, der Stickoxide aus Abgasen entfernt. Die Autoindustrie braucht in den nächsten Jahren ein solches System, das auch bei Turbodieseln funktioniert. Denn die Einspritztechnik reduziert zwar den Treibstoffverbrauch, doch höhere Verbrennungstemperaturen, Schwefel im Kraftstoff und immer mehr Sauerstoff im mageren Kraftstoffgemisch setzen dem bekannten »Kat« zu. Deshalb erfüllen derzeitige Motoren die Abgasnorm Euro V noch nicht, die Ende des Jahrzehnts gelten soll. Ein HTE-Katalysator, der auch unter mageren Abgasbedingungen Stickoxide zu Stickstoff reduziert, ist derzeit noch nicht thermisch stabil genug. Das Heidelberger Unternehmen will das Problem mit einer veränderten Zusammensetzung des Materials lösen und denkt bereits an weitere Einsatzgebiete. Von der Heizung privater Haushalte bis zum Kraftwerk – bessere und preiswertere Katalysatoren gegen die Umweltgifte sind in der Energietechnik sehr gefragt. ◁

Norbert Aschenbrenner ist promovierter Chemiker und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in München.

Die Ökonomie der Kinderarbeit

Weltweit werden Millionen Kinder als billige Arbeitskräfte ausgebeutet. Um diesen Skandal zu beenden, reichen Verbote allein nicht aus. Der lange Arm des Gesetzes muss sich mit der unsichtbaren Hand des Marktes verbünden.

Lastwagenfabrik »Ostwind« in der chinesischen Stadt Shiyan (unten). Kohleförderung in Dhanbad im indischen Bundesstaat Bihar (rechts)



Von Kaushik Basu

Zu Beginn der industriellen Revolution ließen sich Erfinder oft recht freimütig über Sinn und Zweck ihrer Innovationen aus. Als Mittel zur Einsparung menschlicher Arbeitskraft pries der englische Mechaniker John Wyatt seine Walzenspinnmaschine den Textilfabrikanten an. All die geschickten und erfahrenen Handwerker am Spinnrad seien nun nicht mehr nötig, denn die Bedienung seiner Apparatur sei kinderleicht. Von hundert Arbeitern, so rechnete er im Jahre 1741 vor, könne der Fabrikant dreißig seiner besten entlassen und statt dessen zehn Krüppel oder Kinder einstellen. Davon ließ sich auch der britische Kronanwalt überzeugen; in der Patentschrift merkte er an, »selbst fünf- bis sechsjährige Kinder« könnten die Maschine bedienen.

Eine Erfindung zu empfehlen, weil sie Kinderarbeit fördert – das erscheint uns heute als Anekdote aus grauer Vorzeit. In den meisten industrialisierten Ländern ging die Ausbeutung von Kindern bereits Ende des 19. Jahrhunderts zurück. Doch weltweit ist das Problem noch keineswegs überwunden. Die Internationale Arbeitsorganisation (ILO) geht für das Jahr 2000 von etwa 186 Millionen illegalen Kinderarbeitern im Alter von 5 bis 14 Jahren aus, überwiegend in Entwicklungsländern. Das wäre jedes sechste Kind dieser Erde. Geschätzte 111 Millionen von ihnen verrichteten gefährliche Arbeit in Bergwerken, auf Baustellen oder in der Landwirtschaft. Sie werden ihr Leben lang unter gesundheitlichen Folgeschäden leiden. Rund 8 Millionen Kinder fristeten ihr Dasein als Sklaven, Kindersoldaten oder Prostituierte.

Diese erschreckenden Statistiken sind gewiss mit einiger Vorsicht zu beurteilen, da sich Kinderarbeit besonders schwer definieren und in Zahlen fassen lässt. So ist die ILO zwar darauf bedacht, normale Haushaltstätigkeit nicht als Kinderarbeit zu werten; doch ihre Zahlen suggerieren auf die eine oder andere Art sowohl eine Überschätzung als auch eine Unterschätzung des Problems. Manchmal gelten Kinder schon wegen leichter Tätigkeiten als Arbeiter und trei-



ALLE FOTOS: SEBASTIÃO SALGADO / CONTACT PRESS IMAGES

ben damit die Zahlen hoch; andererseits wird bei Mädchen die Hausarbeit – worunter häufig die Schulbildung leidet – völlig unterschätzt. Trotz dieser Vorbehalte stimmen die Forscher darin überein, dass die ILO-Zahlen im Großen und Ganzen zutreffen.

Was ist zu tun? Die Antwort hängt wesentlich davon ab, wo die Ursachen gesehen werden. Dank intensiver Forschungsarbeit ist unser Wissen um die Hintergründe in den letzten Jahren beträchtlich gewachsen. Dadurch sind Zweifel an der früher von vielen Politikern und Aktivisten propagierten »Nulltoleranz« erwacht. In den 1990er Jahren war oft der Ruf nach einem sofortigen Importstopp für Produkte aus Kinderhand zu hören. Die Welthandelsorganisation wurde gedrängt, Sanktionen gegen Länder mit weit verbreiteter Kinderarbeit zu verhängen. Hinter diesen Appellen verbarg sich zum Teil simple Unkenntnis, oft aber auch protektionistisches Eigeninteresse – mit dem Ziel, heimische Arbeitsplätze von ausländischer Konkurrenz abzuschirmen –, das sich als Sorge um die armen Kinder tarnte.

Einen typischen Fehlschlag dokumentiert eine Unicef-Studie von 1995 am Beispiel Nepal. In den 1990er Jahren betrieben Gegner der Kinderarbeit einen weltweiten Handelsboykott gegen handgeknüpfte Teppiche aus Nepal. Darauf reagierten viele nepalesische Teppichfabrikanten, indem sie einfach sämtliche Kinderarbeiter feuerten. Infolgedessen wurden 5000 bis 7000 Mädchen zu Prostituierten. Eine gut gemeinte Kampagne schadete schließlich genau denen, die sie zu schützen suchte. Mit genauerer Kenntnis der wirtschaftlichen Zusammenhänge sind solche Fehlschläge vermeidbar.

Ursache Elternarmut

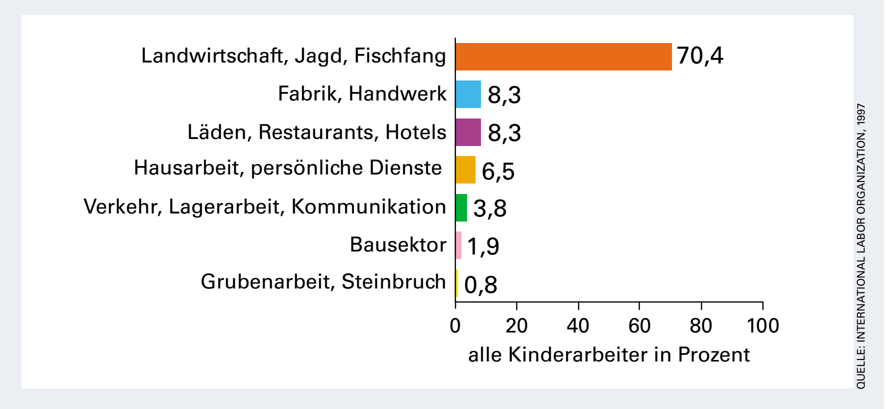
Im 19. Jahrhundert schrieben Kommentatoren meist der elterlichen Faulheit die Schuld daran zu, dass Kinder arbeiten mussten. Das Gleichsetzen von Kinderarbeit mit Kindesmissbrauch lieferte eine plausible Begründung für gesetzgeberi- ▷

IN KÜRZE

- **In Entwicklungsländern** – aber nicht nur dort – werden viele Kinder zur Arbeit in der Landwirtschaft, in Fabriken, Bergwerken oder Bordellen gezwungen.
- **Pauschale Verbote** der Kinderarbeit für Exportartikel treiben die Kinder oft in Hunger oder Prostitution. Ihre Lage verschlimmert sich dadurch nur noch mehr.
- Kinderarbeit wirkt oft **selbstverstärkend**: Sie treibt das Arbeitskräfte-Angebot hoch, drückt das Lohnniveau und zwingt dadurch Familien erst recht, die Kinder arbeiten zu lassen. Doch auch bei ihrer Abschaffung wirken selbstverstärkende Tendenzen: Das Angebot an Arbeitskräften sinkt, die Löhne steigen, die Kinder müssen nicht mehr arbeiten.
- **Eine geschickte Kombination** von selektiven Verboten und staatlicher Familienhilfe kann bewirken, dass eine Volkswirtschaft, deren Gleichgewicht auf Kinderarbeit beruht, in einen anderen Gleichgewichtszustand übergeht.

Kinderarbeit nach Branchen

Bei Ausbeutung von Kindern denkt man meist an Fabriken oder Handwerksbetriebe, doch in Wahrheit arbeitet nur ein Bruchteil dort. Die meisten Kinder schuften im Agrarsektor – auf dem Hof der Eltern oder in großen Plantagen. In manchen Ländern ist mehr als ein Viertel aller Landarbeitskräfte jünger als 15 Jahre.



▷ sche Schritte. Erst seit kurzem setzt sich – auf Grund autobiografischer Zeugnisse von Arbeitern sowie umfangreicher Daten über Privathaushalte in Entwicklungsländern – die Erkenntnis durch, dass die meisten Eltern ihre Kinder niemals zur Arbeit schicken würden, wären sie nicht durch äußerste Armut dazu gezwungen.

Dass dieser Zusammenhang von Ursache und Wirkung nicht immer auf der Hand liegt, zeigen Haushaltsdaten, die 1991 in ländlichen Regionen Pakistans gesammelt wurden. In manchen armen Gebieten ließen eher die etwas wohlhabenderen Familien ihre Kinder arbeiten als die ärmsten. Auf den ersten Blick scheint dieses Ergebnis der Armutshypothese zu widersprechen. Doch in rückständigen ländlichen Gegenden funktioniert der Arbeitsmarkt schlecht. Selbst wenn ein verarmter Haushalt dringend auf die Aufbesserung des Familieneinkommens durch Kinderarbeit angewiesen wäre, finden sich oft keine Jobs. Nur Familien, die etwas Land besitzen, können dem Problem ausweichen, indem sie ihre Kinder auf dem eigenen Feld einsetzen. Da Grundbesitz eine Form von Reichtum ist, entsteht der Eindruck, Kinderarbeit sei eher in reicheren Haushalten anzutreffen. Doch natürlich ist nicht größerer Wohlstand die Ursache dafür, dass die Kinder arbeiten; dahinter verbirgt sich Landbesitz, der Kinderarbeit erst ermöglicht.

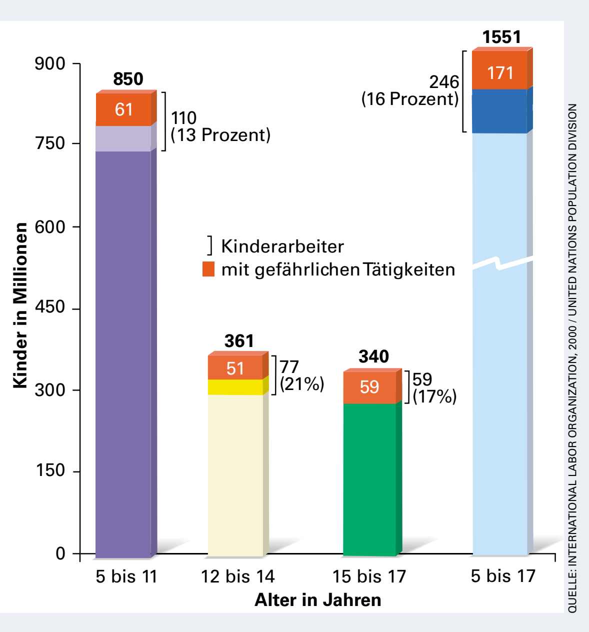
Ist eine bestimmte Wohlstandsschwelle erst einmal überschritten, geht die Anzahl arbeitender Kinder zurück. Die Forscher unterteilten die pakistanischen Haushalte in drei Gruppen: minimal (weniger als ein Hektar Land), klein (ein bis drei Hektar) und groß (mehr als drei Hektar). Der Prozentsatz der Kinderarbeit steigt von minimalen zu kleinen Haushalten, sinkt aber bei großen wieder ab. Hat ein Haushalt ein gewisses Wohlstandsniveau erreicht, ist er weniger darauf angewiesen, seine Kinder zur Arbeit zu zwingen.

Mehrfach-Gleichgewichte

Auch globale Verlaufsstatistiken stützen die Ansicht, dass Kinderarbeit mit wachsendem Wohlstand abnimmt. In China beispielsweise sank die Kinderarbeitsquote der Zehn- bis Vierzehnjährigen von 48 Prozent im Jahr 1950 stetig auf 12 Prozent im Jahr 1995. Am steilsten fiel sie in den 1980er Jahren, als die Wirtschaft des Landes rasch wuchs. Das Gleiche gilt für Vietnam und Indien, wo westliche Forscher die Daten besser überprüfen können. Umgekehrt nahm die Kinderarbeit in Ländern mit stagnierender Wirtschaft kaum ab – in Kambodscha beispielsweise nur von 29 auf 25 Prozent in derselben Zeitspanne.

Die Bedeutung der elterlichen Armut erklärt, warum Kinderarbeit so schwer auszurotten ist. In Großbritannien breitete sie sich bis 1860 immer weiter aus, obwohl in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts mehrfach Gesetze erlassen wurden, welche die Firmen, die nachweislich Kinder beschäftigten, mit Bußgeldern belegten. Dem Arbeitgeber entstanden zusätzliche Kosten, die er durch niedrigere Stundenlöhne für die Kinder auszugleichen trachtete. Infolgedessen schufteten die Kinder noch länger, um weiterhin denselben Beitrag zum Haushaltseinkommen zu leisten. Paradoxerweise haben die Gesetze auf diese Weise die Kinderarbeit wahrscheinlich nur noch verschlimmert. Dasselbe Risiko besteht auch bei heutigen Gesetzen wie dem indischen »Child Labor Act«

Kinderarbeit nach Alter



Auch heute ist Ausbeutung Minderjähriger extrem häufig. Die Internationale Arbeitsorganisation zählt 245,5 Millionen Arbeitskräfte unter 17 Jahren – fast jeder sechste Erdenbürger dieser Altersgruppe. Davon üben 170,5 Millionen gefährliche Tätigkeiten aus – mit hohem Unfallrisiko, langen Arbeitszeiten oder direktem Missbrauch (rot). Jedes Kind unter 12 Jahren, das gegen Bezahlung arbeitet, gilt statistisch als Arbeitskraft; Kinder von 12 bis 14 Jahren dürfen bis zu 14 Stunden pro Woche arbeiten, ohne als Arbeitskräfte zu gelten. Ab 15 Jahren dürfen sie jede Art von ungefährlicher Arbeit tun.

Zuckerrohrernte in der Zona da Mata in der brasilianischen Provinz Pernambuco

von 1986, das ebenfalls für Firmen, die Kinder einstellen, Bußgelder vorsieht.

Angesichts dieser Fakten verfallen manche Beobachter ins andere Extrem und sehen in staatlichen Maßnahmen überhaupt keinen Sinn. Doch unter bestimmten Umständen kann ein gesetzliches Verbot durchaus wirksam sein und die Lage der Kinder und ihrer Eltern verbessern. Dies geht aus einer Analyse von Angebots- und Nachfragekurven hervor.

In solchen Diagrammen markiert der Schnittpunkt der beiden Kurven den Gleichgewichtspreis einer Ware, bei dem sich Nachfrage und Angebot gerade die Waage halten. Im Fall des Arbeitsmarkts ist die angebotene Ware die Menge Arbeit, die geleistet wird, und der je nach Nachfrage dafür erzielbare Preis ist der Stundenlohn. Von der Lohnhöhe hängt einerseits die Bereitschaft der Arbeiter ab, zu arbeiten – das Angebot –, andererseits die Bereitschaft der Unternehmer, sie einzustellen – die Nachfrage. Im Lehrbuchmodell gilt: Mit steigendem Lohn wächst das Angebot an Arbeitskräften, aber die Nachfrage sinkt. Bei fallenden Löhnen gilt das Umgekehrte. Es kann demnach nur einen einzigen Gleichgewichtslohn geben, bei dem Angebot und Nachfrage übereinstimmen.

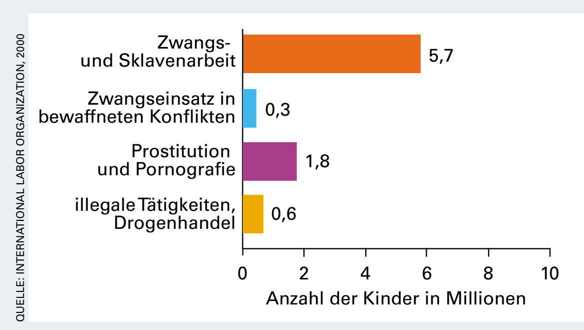
Doch auf manche Märkte trifft das Lehrbuchmodell nicht zu: Angebot und Nachfrage können bei mehr als einem Stundenlohn übereinstimmen. Der Arbeitsmarkt in armen Ländern ist ein Beispiel für dieses multiple Gleichgewicht. Betrachten wir ein Land, in dem die Löhne für Erwachsene so niedrig sind, dass auch Kinder zur Arbeit gedrängt werden. Angenommen, dieses Land erzwingt ein wirksames Verbot der Kinderarbeit. Betriebe, die bisher Kinder beschäftigt haben, werden nun versuchen, die Lücken mit Erwachsenen zu füllen. Im Wettbewerb um das um die Kinder reduzierte Angebot an Arbeitskräften müssen die Unternehmer höhere Löhne zahlen.

Nun kommt der Clou: Hätte von Anfang an dieser Lohnsatz gegolten, dann hätte vielleicht niemand seine Kinder zur Arbeit geschickt. Selbst wenn das Gesetz wieder aufgehoben wird, braucht kein Kind mehr zu arbeiten – die Eltern verdienen selbst genug, um über die Runden zu kommen.

Das Gesetz wirkt also einfach als Hebel, der die Volkswirtschaft vom Niedriglohn-Gleichgewicht mit verbreiteter Kinderarbeit in ein Hochlohn-Gleichgewicht ▷

Schlimmste Formen der Kinderarbeit

Mehr als 8 Millionen Kinder fristen ihr Dasein in Schuldknechtschaft, als Kindersoldaten oder als Opfer sexuellen und anderen Missbrauchs. Etwa eine halbe Million lebt in den Industrieländern Europas und Amerikas, meist im Prostituierten- oder Drogenmilieu. Geschätzte 1,2 Millionen Kinderarbeiter werden jährlich über Landesgrenzen verschleppt.



▷ versetzt, bei dem die Kinder zur Schule gehen, statt sich mit Erwachsenenarbeit zu plagen (siehe Kasten unten). Ist das neue Gleichgewicht erst einmal etabliert, dann liegt dieser Zustand sowohl im Eigeninteresse der Arbeitgeber als auch der Beschäftigten und übersteht sogar wirtschaftliche Turbulenzen, etwa eine kleinere Rezession. Das Gesetz hat seine Schuldigkeit ein für alle Mal getan. Solche Interventionen habe ich zusammen mit Pham Hoang Van von der University of Missouri als »gutartige legislative Eingriffe« beschrieben, um sie von den üblichen Maßnahmen zu unterscheiden, die dauernde Überwachung und Strafandrohung erfordern (siehe Kasten auf der Seite gegenüber).

Wege aus der Falle

In theoretischen Modellen betrachten Volkswirte den Wechsel von einem Gleichgewicht zum anderen oft als kostenneutral. In der Praxis ist dies natürlich keineswegs der Fall: Firmen, die bisher von Kinderarbeit lebten, müssen wahrscheinlich in neue Technologien investieren, und der Staat muss im ganzen Land mehr Schulen bauen. Dennoch untermauert ein Blick in die Vergangenheit unsere These. Zum Beispiel spielte im Amerika des ausgehenden 19. Jahrhunderts die Gesetzgebung eine entscheidende Rolle für den Rückgang der Kinderarbeit.

Multiple Gleichgewichte entstehen auch auf andere Weise. Ein Haushalt, der seine Kinder zur Arbeit schickt, wird dafür mehr oder weniger stigmatisiert.

Multiples Marktgleichgewicht

Arbeit hat ihren Preis – oft mehr als einen

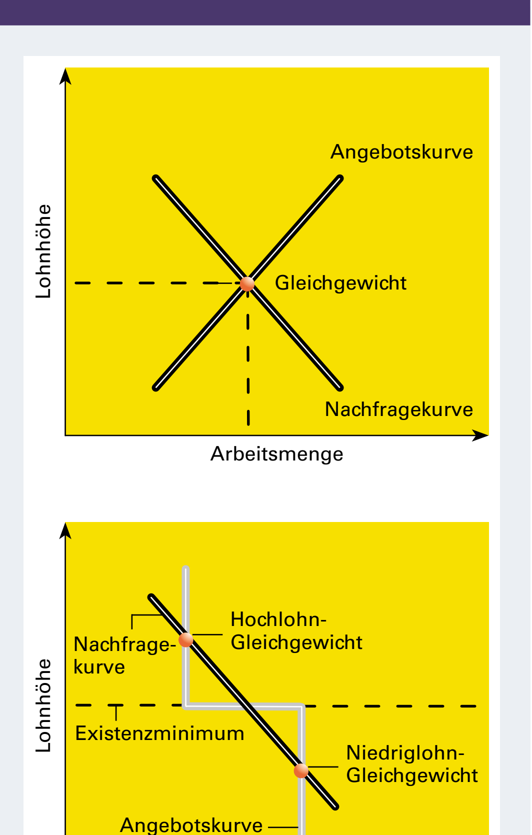
Angebots- und Nachfrage-Kurven symbolisieren die Bereitschaft der Marktteilnehmer, ein Produkt je nach seinem Preis zu verkaufen beziehungsweise zu kaufen. Im Normalfall schneiden sich die beiden Kurven in einem einzigen Punkt, der den Preis des Produkts auf dem freien Markt angibt (oben).

Doch bei einem Arbeitsmarkt, auf dem Kinder als mögliche Arbeitskräfte gelten, können sich Angebots- und Nachfragekurve in mehr als einem Punkt schneiden. Der Zwang zur Kinderarbeit entsteht, wenn das Einkommen der Erwachsenen unter das Existenzminimum sinkt. Nehmen wir an, ein Kind leiste einen gewissen Bruchteil der Arbeitsleistung eines Erwachsenen. Daraus entsteht eine treppenförmige Angebotskurve und ein Arbeitsmarkt mit multiplem Gleichgewicht (unten).

Diese Treppenkurve zeigt an, wie viele Arbeitskräfte den Unternehmern je nach dem Lohn, den sie auszahlen, zur Verfügung stehen. Sobald der Lohn das Existenzminimum übersteigt, entfällt der Zwang zur Kinderarbeit und jeder Haushalt leistet eine Arbeitseinheit, die von Erwachsenen erbracht wird. Liegt der Lohn unter dem Existenzminimum, dann leistet jeder Haushalt mehr als eine Arbeitseinheit, denn nun tragen auch die Kinder etwas bei. Das Verhalten der Unternehmer lässt sich an der Nachfragekurve ablesen. Sie verläuft von links oben nach rechts unten: Damit ein Unternehmer viele Arbeiter einstellt, müssen die Löhne niedrig sein.

Ein solcher Arbeitsmarkt kann sich auf einem von zwei möglichen Gleichgewichtspunkten einpendeln: Entweder gilt das hohe Lohnniveau, dann arbeiten ausschließlich Erwachsene; oder die Löhne sind niedrig, dann arbeiten auch Kinder. In differenzierten Modellen kann die Angebotskurve anders aussehen. Wenn Kinder beispielsweise nur arbeiten, um den Fehlbetrag zwischen Elterneinkommen und Existenzminimum zu erwirtschaften, wird der horizontale Abschnitt der Angebotskurve zu einer abwärts gekrümmten Hyperbel. Grundsätzlich bleibt es aber beim multiplen Gleichgewicht.

Hat der Markt nur einen einzigen Gleichgewichtspunkt, dann läuft ein gesetzliches Verbot von Kinderarbeit den natürlichen Marktendenzen zuwider. Selbst wenn solche Maßnahmen Wirkung zeigen, beeinträchtigen sie die Wirtschaft, was wiederum neue soziale Probleme schaffen kann. Multiple Gleichgewichte ermöglichen einen Ausweg aus diesem Dilemma. Eine im Niedriglohn-Gleichgewicht gefangene Volkswirtschaft kann durch ein Verbot in das Hochlohn-Gleichgewicht bugsiert werden; von da an stabilisieren die Marktmechanismen den gewünschten Zustand, statt gegen ihn zu arbeiten. Ökonomisch gesehen sind alle Gleichgewichtspunkte gleich effizient.



Dem ökonomischen Standardmodell zufolge steigt die Kurve des Arbeitskräfte-Angebots geradlinig an – das heißt, höhere Löhne locken mehr Arbeiter an. Die Nachfragekurve fällt hingegen, denn hohe Löhne schrecken die Unternehmer ab. Die Kurven kreuzen sich in einem Punkt (oben). In extrem armen Ländern kann die Angebotskurve die Form einer Treppe annehmen (unten). Der Grund: Löhne unter dem Existenzminimum ziehen zusätzliche Arbeitskräfte an, weil nun auch Kinder arbeiten müssen. In solchen Fällen treffen sich Angebot und Nachfrage in mehr als einem Punkt.

Der Grad der Stigmatisierung verhält sich umgekehrt proportional zur Verbreitung der Kinderarbeit in der gesamten Gesellschaft. Je mehr Kinder arbeiten, desto eher sind die Leute an dieses Übel gewöhnt und desto weniger schändlich erscheint es ihnen. Viele Familien finden dann gar nichts dabei, ihre Kinder zur Arbeit zu schicken, und die Gesellschaft befindet sich in einem Gleichgewicht.

Wenn hingegen nur wenige Kinder arbeiten, werden deren Eltern von Nachbarn und Freunden verachtet. In solchen Milieus zwingen nur äußerst bedürftige Familien ihre Kinder zur Arbeit. Die Folge: Kinder arbeiten selten, die Gesellschaft ist in einem anderen Gleichgewicht – die geringe Neigung zur Kinderarbeit verstärkt sich selbst. Nur wenn die Häufigkeit der Kinderarbeit zwischen diese beiden Niveaus gerät, geht das Gleichgewicht verloren, und die Gesellschaft wandelt sich, bis sie wieder eines der möglichen Gleichgewichte erreicht.

Soziale Kipp-Phänomene

Auch der so genannte Armutskreislauf bringt multiple Gleichgewichte hervor: Wer selbst als Kind arbeiten musste, hat weniger Bildung, wird als Erwachsener in der Regel ärmer sein und darum wiederum seine Kinder arbeiten lassen. Auf diese Weise entsteht ein dauerhafter Teufelskreis. Umgekehrt können Familien über Generationen hinweg in einen Kreislauf steigenden Wohlstands geraten. Diese Theorie wurde kürzlich anhand umfangreicher Daten über Haushalte in Brasilien untermauert: Tatsächlich neigen dort ehemalige Kinderarbeiter eher dazu, den Nachkommen das eigene Schicksal aufzuzwingen.

Dies gilt interessanterweise sogar dann, wenn man nur Haushalte mit gleichem Einkommen heranzieht: Die ehemaligen Kinderarbeiter setzen die unselige Familientradition in der Regel fort, während ebenso arme Eltern, die nicht von klein auf arbeiten mussten, ihre Kinder damit verschonen. Dies beweist einmal mehr, dass die Wirtschaft zwar der wichtigste Faktor ist, aber nicht der einzige. Eltern, die von klein auf nichts anderes gekannt haben als Arbeit, legen meist auch bei ihren Kindern nicht viel Wert auf Schule und Ausbildung.

Die Tendenz der Kinderarbeit, sich durch soziale und ökonomische Mechanismen selbst zu verstärken, gibt auf den ersten Blick wenig Anlass zu Hoffnung. Doch umgekehrt gilt: Ist sie erst einmal durch Reformen überwunden, so kehrt sie nicht wieder. Multiple Gleichgewichte sind eng mit Kipp-Phänomenen verwandt, bei denen eine geringfügige Veränderung plötzlich eine heftige Bewegung auslöst – wie wenn ein Krug behutsam immer weiter geneigt wird, bis er auf einmal umfällt.

Angenommen, eine Gesellschaft mit multiplem Gleichgewicht verharrt im Zustand mit hoher Kinderarbeit, aber durch Gesetz oder allmählichen Gesinnungs- ▷

Gutartige Interventionen

Staatliche Eingriffe in freie Märkte

Nach Überzeugung der meisten Ökonomen sind freie Märkte einer zentral geplanten Wirtschaft überlegen: Wenn jeder seinem Eigeninteresse folgen kann, geht es allen besser. Doch nicht immer führt das rationale Verhalten der einzelnen Marktteilnehmer automatisch zu einem sozialpolitisch erwünschten Ziel. Das Modell des multiplen Gleichgewichts erklärt, warum.

Betrachten wir die Debatte, die im 19. Jahrhundert um die Begrenzung der Arbeitszeit geführt wurde. Gemäß dem üblichen Laisser-faire-Standpunkt geht es den Staat nichts an, wenn ein Arbeiter bereit ist, pro Tag 14 Stunden zu arbeiten und ein Unternehmer ihn dafür bezahlen will. Doch die Details von Angebot und Nachfrage sind komplizierter.

Angenommen, es gibt 100 Arbeiter und einige Unternehmer, das Existenzminimum liegt bei 12 Dollar pro Tag und kein Arbeiter würde freiwillig länger als acht Stunden arbeiten, wenn er in dieser Zeit auf das Existenzminimum käme. Bei einem Stundenlohn von 2 Dollar verdient ein Arbeiter in acht Stunden 16 Dollar; alle zusammen leisten somit 800 Arbeitsstunden täglich. Beträgt der Stundenlohn hingegen nur 1 Dollar, dann müssen die Arbeiter 12 Stunden schuften, um das Existenzminimum zu verdienen; sie leisten dafür insgesamt 1200 Arbeitsstunden.

Für die Unternehmer gilt: Sie stellen umso bereitwilliger Arbeiter ein, je niedriger die Löhne sind. Nehmen wir an, ihre Gesamtnachfrage beträgt bei einem Stundenlohn von 1 Dollar 1200 Arbeitsstunden pro Tag, aber bei 2 Dollar Stundenlohn nur 800 Arbeitsstunden.

In diesem Szenario gibt es zwei Gleichgewichtspunkte: Sowohl bei 1 Dollar als auch bei 2 Dollar Stundenlohn halten sich Angebot und Nachfrage exakt die Waage. Ist eine solche Volkswirtschaft im Ein-Dollar-Gleichgewicht gefangen, dann »will« tatsächlich jeder Arbeiter 12 Stunden pro Tag arbeiten. Doch ein Gesetz, das den Arbeitstag auf acht Stunden begrenzt, wäre durchaus im Interesse der Arbeiter – es wäre eine »gutartige Intervention«. Jeder einzelne Arbeiter würde dieses Gleichgewicht wählen, wenn er könnte; aber erreichbar ist es nur durch gemeinsames Handeln. Für die Unternehmer ist das Hochlohn-Gleichgewicht weniger vorteilhaft: Jeder Wandel hat Gewinner und Verlierer.

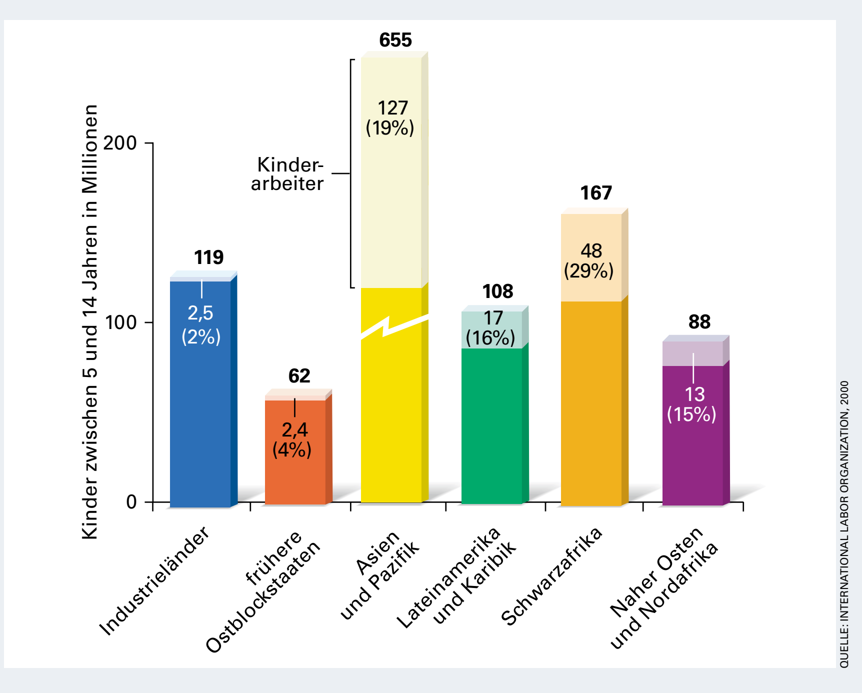
In wirtschaftspolitischen Debatten stehen sich Verfechter des freien Marktes und Befürworter einer staatlich gelenkten Wirtschaft oft unversöhnlich gegenüber. Das Modell des multiplen Gleichgewichts eröffnet einen Mittelweg, der dem Markt möglichst freien Spielraum lässt und zugleich anerkennt, dass in bestimmten Situationen staatliche Interventionen nötig sind.



Gießerei Shih-Yen in der chinesischen Provinz Hubei

Kinderarbeit nach Regionen

In absoluten Zahlen arbeiten die meisten Kinder in den süd- und ostasiatischen Entwicklungsländern. Doch prozentual betrachtet ist Kinderarbeit in Afrika südlich der Sahara am häufigsten: Schätzungsweise 29 Prozent der Fünf- bis 14-Jährigen müssen dort für ihren Lebensunterhalt arbeiten. In den Industrieländern ist das Übel zwar viel seltener, aber keineswegs völlig überwunden.



▷ wandel wird das Übel Schritt für Schritt zurückgedrängt. An einem bestimmten Punkt gerät der Arbeitsmarkt in den Anziehungsbereich des anderen Gleichgewichts. Von nun an nimmt die Kinderarbeit rapide ab, und zwar ohne zusätzliche Maßnahmen. Beispielsweise war sie in den USA – obwohl seit 1830 in vielen Bundesstaaten verboten – bis etwa 1900 weit verbreitet. Doch als sie endlich zurückging, geschah dies äußerst rasch. Um 1930 war sie fast verschwunden.

Gesucht: flexibler Maßnahmen-Mix

Einmal wollte mich ein Freund zu regelmäßigem Lauftraining ermutigen: Schon zehn Minuten Jogging, behauptete er, würden meine Lebenserwartung um acht Minuten verlängern. Auf den ersten Blick war das ein echter Anreiz, doch dann fiel mir auf, dass es darauf ankam, was ich in meinem Leben maximieren wollte. Wenn ich mir möglichst viel Lebenszeit wünschte, in der ich nicht laufen musste, dann ergab sich, dass zehn Minuten Jogging mein joggingfreies Leben jedes Mal um zwei Minuten verkürzen würden. Das Beispiel mutet wie ein Witz an, doch es verdeutlicht eine wichtige und häufig missachtete Tatsache: Ob eine bestimmte Maßnahme wünschenswert ist oder nicht, hängt vom letztlich angestrebten Ziel ab.

Wird die Abschaffung der Kinderarbeit nicht um ihrer selbst willen angestrebt, sondern damit die Kinder zu produktiven und glücklichen Menschen heranwachsen können, dann müssen alle Maßnahmen an diesem höheren Ziel gemessen werden. In den ärmsten Regionen wird die Gesellschaft möglicherweise zulassen, dass Kinder einige Stunden pro Tag arbeiten. Wie Untersuchungen in Peru und Brasilien zeigen, lässt sich oft nur so der Schulbesuch finanzieren und damit langfristig der Armutskreislauf durchbrechen. Solche Befunde werfen sicherlich unbequeme moralische Fragen auf, doch keine Maßnahme vermag zu greifen, wenn sie nicht die Lebenswirklichkeit berücksichtigt.

Viele Kommentatoren sehen wie ich im Erlass von Gesetzen nicht den Königsweg zur Bekämpfung der Kinderarbeit – außer in einigen Spezialfällen, in denen wir die Existenz multipler Gleichgewichte vermuten und einen gutartigen legislativen Eingriff unternehmen dürfen. Im Allgemeinen sollten die Verantwortlichen bessere Arbeitsbedingungen und höhere Löhne für Erwachsene anstreben, um damit der Kinderarbeit den Boden zu entziehen. Zum Beispiel können Krisenzeiten mit unsicherem Einkommen die Eltern zwingen, ihre Kinder von der Schule zu nehmen. Selbst wenn die Kinder später zum Unterricht zurückkehren, finden sie oft den Anschluss nicht mehr und brechen den Schulbesuch ganz ab. Werden den Eltern aber günstige Kredite und Unterstützung gewährt, können sie harte Zeiten durchstehen, ohne dass ihre Kinder arbeiten müssen. Schon kleine Anreize wie Schulspeisungen oder staatliche Zuschüsse für Eltern senken die Kinderarbeitsquote drastisch; das hat sich in Brasilien und Bangladesch gezeigt.

Angesichts der überwältigenden Probleme liegt es nahe, entweder in die Falle der Gleichgültigkeit zu gehen und alles dem Markt zu überlassen, oder in die Falle moralischer Selbstgerechtigkeit: Dann ist man versucht, Kinderarbeit auf einen Schlag auszumerzen, ohne Rücksicht auf das Wohlergehen der vermeintlichen Nutznießer dieser Maßnahme. Mit unserem heutigen Wissen um die Zusammenhänge sind wir in der Lage, das Problem zu lösen – wenn wir behutsam vorgehen und sorgfältig abgestimmte Maßnahmen ergreifen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Kaushik Basu ist Professor für Wirtschaftswissenschaften an der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York) und Autor zahlreicher Abhandlungen über Entwicklungs- und Sozialökonomie, Spieltheorie und industrielle Organisation. Er ging in Kalkutta (Indien) zur Schule und studierte Wirtschaftswissenschaften an der London School of Economics.

Child Labor: Cause, Consequence and Cure with Remarks on International Labor Standards. Von Kaushik Basu in: Journal of Economic Literature, Bd. 37, S. 1083 (1999).

Hard at Work in Factories and Mines: The Economics of Child Labor during the British Industrial Revolution. Von Carolyn Tuttle. Westview Press, Boulder 1999.

The Economics of Child Labor. Von Kaushik Basu und Pham Hoang Van in: American Economic Review, Bd. 88, S. 412 (1998).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Evolution der Kettenbriefe

Ein neues Verfahren findet Verwandtschaftsrelationen für die verschiedensten Dinge: Genome in der Biologie, Sprachen, Hausaufgaben – und Kettenbriefe.

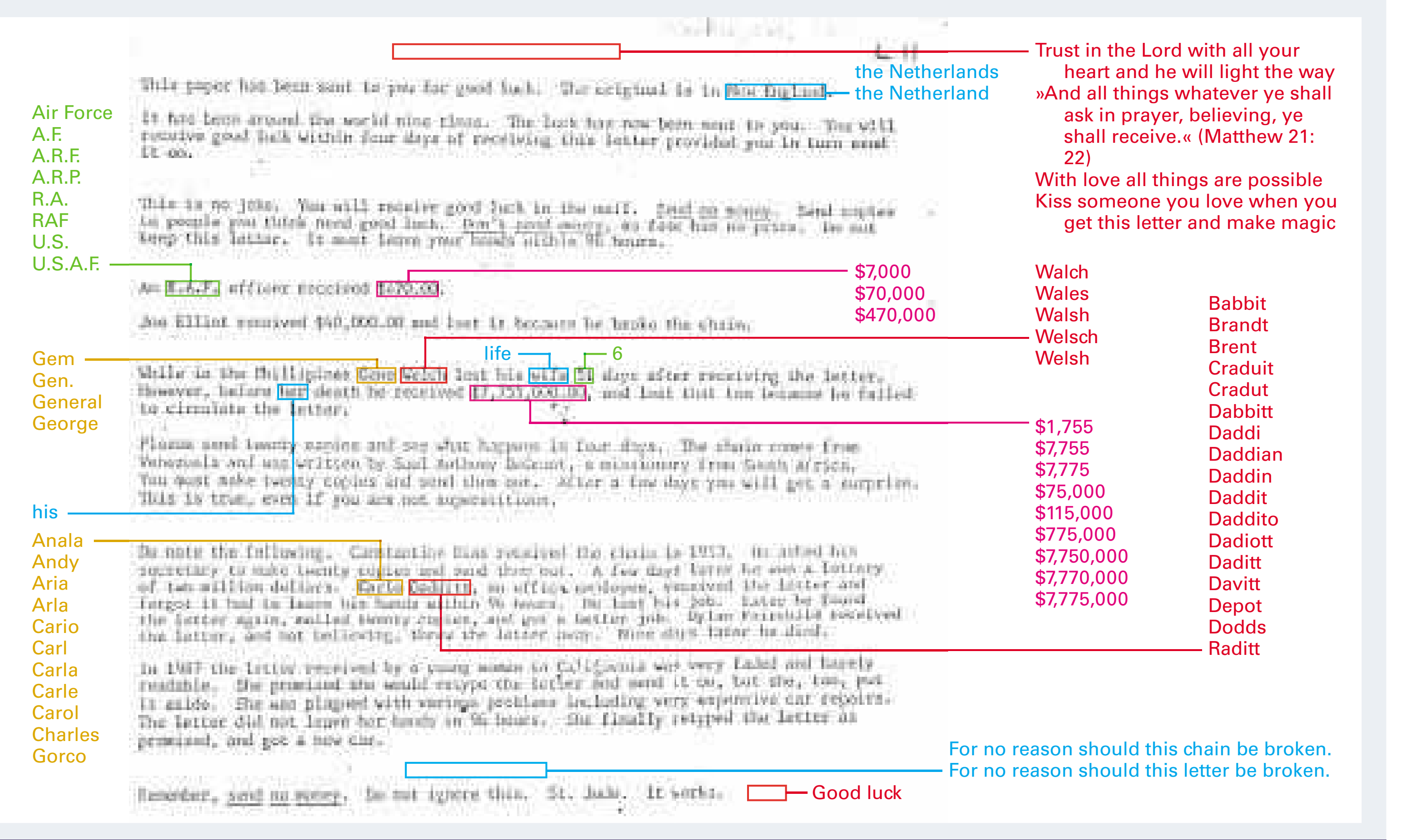
Von Charles H. Bennett, Ming Li und Bin Ma

Vor uns liegen 33 Versionen eines Kettenbriefs, die zwischen 1980 und 1995 gesammelt wurden. In diesem Zeitraum waren Fotokopierer bereits weit verbreitet; E-Mail spielte dagegen noch keine Rolle. Die Briefe wanderten von Mensch zu Mensch, vermehrten sich und veränderten sich immer wieder ein bisschen. In irgendeiner Variation hat dieser Brief vermutlich Millionen von Menschen erreicht.

Ein Kettenbrief ist ungefähr 2000 Zeichen lang, wie ein durchschnittliches Gen. Wie ein gefährliches Virus droht er seinen Empfänger zu töten und bewirkt, dass man ihn an »Freunde und Bekannte« weiterreicht. Wie ein erbliches Merkmal verspricht er Vorteile für den Empfänger und alle Menschen, an die dieser ihn weitergibt. Wie Genome sind Kettenbriefe der natürlichen Selektion ausgesetzt, und manchmal werden Teile von ihnen sogar zwischen Briefen verschiedener »Arten« übertragen.

Thema mit Variationen

Kettenbriefe wurden durch Abschreiben verändert, vermutlich nachdem sie durch mehrfaches Fotokopieren unleserlich geworden waren; hier als Beispiel der Kettenbrief L11. Die größten Variationen treten bei unbekannten Namen und Geldbeträgen auf. Fehler in diesen Elementen werden leicht übersehen, weil sie die Bedeutung des Briefes nicht verändern.



Im Gegensatz zu echter DNA sind diese Briefe allerdings leicht lesbar. Das macht sie zu einem geeigneten Material für den Unterricht in Stammesgeschichte: Man sieht die Wirkungen von Mutation und Selektion, ohne sich mit Einzelheiten der Molekularbiologie herumschlagen zu müssen.

Uns interessieren Kettenbriefe nicht so sehr als soziologisches Phänomen, sondern vielmehr als leicht verfügbares Testmaterial für Rechenverfahren, mit denen man in der Molekularbiologie Stammbäume aus den Genomen heute lebender Organismen rekonstruiert. Wenn man diesen Algorithmen vertrauen kann, sollten sie auch für Kettenbriefe brauchbare Ergebnisse liefern. Die Standardmethoden funktionieren für diese Briefe nicht besonders gut. Aber ein neuer Algorithmus, der ursprünglich für Genome entwickelt wurde, ist allgemein genug, um Ähnlichkeiten zwischen Sprachen, Hausaufgaben und eben auch Kettenbriefen zu analysieren. Mit ihm haben wir die Evolutionsgeschichte unserer 33 Briefe rekonstruiert (siehe Kasten Seite 81).

Ein Virus für den Kopf

Wir haben die Briefe unserer Sammlung willkürlich von L1 bis L33 durchnummeriert. Die einzelnen Exemplare unterscheiden sich erheblich. Es gibt 15 verschiedene Titel, 23 Namen »eines Büroangestellten« und 25 Namen für den vorgeblichen Originalautor des Briefes. Häufig wurde ein einzelnes Wort falsch geschrieben, die Reihenfolge der Sätze umgestellt oder Satzteile, Sätze und ganze Absätze hinzugefügt oder weggelassen (Kasten links). Fast alle Briefe sind mehr oder weniger verblasste Fotokopien von maschinengeschriebenem Text. Das lässt vermuten, dass Mutationen stoßweise auftraten: Ein Brief wurde viele Generationen lang immer wieder fotokopiert, bis er so schlecht lesbar geworden war, dass der nächste Empfänger sich entschloss, ihn abzutippen, wobei er neue Fehler und Variationen einfügte. Interessanterweise wird dasselbe Muster – lange Phasen der Stagnation unterbrochen von kurzen Zeitabschnitten heftigen Wandels – auch in der Evolution der biologischen Arten beobachtet.

Alle bis auf drei der Briefe, die wir erhielten, waren Unikate; von L4, L6 und L22 erreichte uns jeweils ein weiteres Exemplar innerhalb einiger Monate nach dem ersten. Neben den 33 englischsprachigen Briefen haben wir noch vier auf Französisch und jeweils einen auf Holländisch und Deutsch bekommen (aber nicht in unsere Studie aufgenommen); alle stammen offensichtlich von einer der englischen Quellen ab.

Für die Analyse der Briefe tippten wir den Text in Computerdateien ab, ▷


Himmels-Brief.

HIMMELS-BRIEF NR 202, MUSEUM NEURUPPIN

Ein Kettenbrief besonderer Art und mit langer Tradition ist der so genannte Himmelsbrief, dessen Original angeblich aus der Hand Jesu Christi oder auf andere magische Weise in die Hände der Menschen gelangt ist (erstmals 584 oder 585 urkundlich erwähnt). Hier abgebildet ist ein »Neuruppiner Bilderbogen« (um 1863). Der Text fährt Himmel und Hölle auf, um den Empfänger zur Weiterverbreitung zu motivieren: »Diesen Brief soll einer dem anderen geschrieben oder gedruckt zukommen lassen: und wenn ihr so viel Sünden gethan hättet, als Sand am Meere, Laub auf den Bäumen und Sterne am Himmel sind, sollen sie euch vergeben werden, wenn ihr glaubt und thut, was dieser Brief euch lehret und saget; wer das aber nicht glaubt, der soll sterben.«

ausschließlich in Kleinbuchstaben und ohne jede zusätzliche Information wie Datum, Randnotizen und die Aufteilung des Textes in Zeilen und Absätze. Jeder Brief wurde so zu einer einzigen zusammenhängenden Zeichenkette.

Standard-Genanalyse: Aneinanderlegen und Vergleichen

Als Erstes wandten wir auf unser Datenmaterial ein Verfahren namens *multiple alignment* (»multiple Passung«) an, das für die Rekonstruktion genetischer Stammbäume häufig verwendet wird. Diese Methode verschiebt bei zwei zu vergleichenden Zeichenketten einzelne Abschnitte gegeneinander mit dem Ziel, möglichst viele Übereinstimmungen zu finden. Die Anzahl der Übereinstimmungen gilt als Maß für die Ähnlichkeit der Zeichenketten – Gene oder Kettenbriefe; aus diesen Zahlen konstruiert ein weiterer Algorithmus einen Stammbaum. *Multiple alignment* findet also auch dann Übereinstimmungen, wenn zwei einander entsprechende Abschnitte durch Einfügungen oder Ausfälle gegeneinander verrutscht sind, nicht aber, wenn innerhalb einer Zeichenkette die Reihenfolge zweier Abschnitte vertauscht ist. Genau das ist bei L12 und L26 der Fall, bei denen Sätze umgestellt wurden. Aus demselben Grund funktioniert diese Technik bekanntermaßen besser innerhalb einzelner Gene als für komplette Genome, wo solche Translokationen (Umstellungen) häufiger vorkommen.

Wir ließen versuchsweise L12 und L26 weg und wandten *multiple alignment* auf die verbleibenden 31 Briefe an. Mit dieser kleineren Auswahl war das Ergebnis immer noch nicht überzeugend, denn der rekonstruierte Stammbaum klassifizierte L6, L7 und L13 als nah verwandt. Diese drei Briefe sind einander nicht unbedingt ähnlicher als irgendeinem anderen Brief aus unserer Sammlung, aber sie sind relativ kurz, weshalb sie eine entsprechend kleinere Zahl an Unterschieden aufweisen. Dieses Problem kann auch in der Genetik auftreten: Das schlichte Zählen der Unterschiede überschätzt die Ähnlichkeit kurzer Genome und unterschätzt die langer Genome. Ein richtiges Maß sollte einem kleinen Unterschied in einem kleinen Genom mehr Gewicht geben als einem ebenso kleinen Unterschied in einem großen Genom.

Wir entschlossen uns, ein eigenes Ähnlichkeitsmaß zu entwickeln, das auf Genome, Kettenbriefe und allgemein jede Art von computerlesbaren Zeichenketten anwendbar sein sollte. Translokationen sollten das Ähnlichkeitsmaß nicht beeinträchtigen, da sie die in der Zeichenkette enthaltene Information nur geringfügig verändern, und Längenunterschiede auch nicht: Unser Verfahren sollte zwei identischen Objekten den Ähnlichkeitswert 1 zuweisen und zwei vollkommen verschiedenen den Wert 0, unabhängig von deren Länge.

Das natürliche Maß für den Informationsgehalt einer Datei ist nicht ihre Länge in Bits, sondern die Anzahl ihrer Bits ohne überflüssiges Beiwerk (Redundanz). Datenkompressionsprogramme wie Zip oder StuffIt bereinigen eine Datei um die gebräuchlichsten Formen von Redundanz (beispielsweise genaue Wiederholungen). Aus der komprimierten, kleineren Datei kann das Original bei Bedarf perfekt wiederhergestellt werden.

Etwas Interessantes geschieht, wenn wir zwei Dateien zusammenfügen und die zusammengesetzte Datei komprimieren. Wenn die beiden Dateien überhaupt keine gemeinsame Information enthalten, wird die zusammengefügte und dann komprimierte Datei so groß sein wie die einzeln komprimierten Dateien zusammen. Aber wenn in beiden Dateien gleiche Teile stecken, wird ein gutes Kompressionsprogramm jeweils einen der beiden Teile einsparen und dadurch eine kürzere Datei produzieren. Das ergibt unser Ähnlichkeitsmaß: Größe der einzeln komprimierten Dateien geteilt durch Größe der gemeinsam komprimierten Datei. Das Ergebnis ist 1 für völlig verschiedene Dateien und 2 für identische Dateien; wenn man also von der so errechneten Zahl noch 1 subtrahiert, ergibt sich ein Ähnlichkeitsmaß, das unsere Forderung erfüllt.

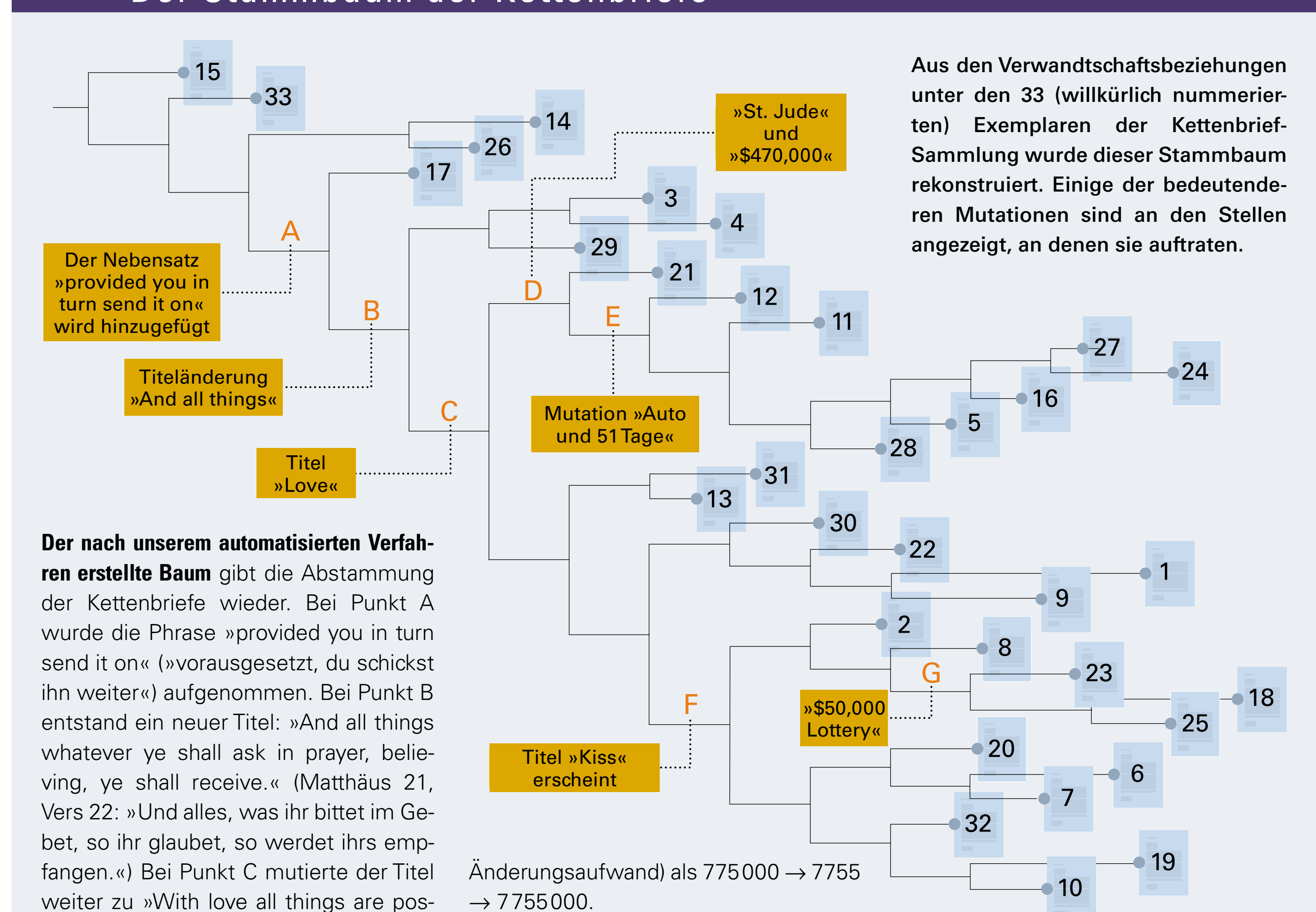
Wie viel Information steckt wirklich in einer Datei?

Offensichtlich hängt unser Ähnlichkeitsmaß vom verwendeten Kompressionsprogramm ab. Welches sollten wir nehmen? Idealerweise eines, das jede Datei auf die kleinstmögliche Größe überhaupt komprimiert. Die Mindestanzahl an Bits, aus denen eine Datei noch fehlerfrei rekonstruierbar ist, heißt deren algorithmische Komplexität oder Kolmogorow-Komplexität; der russische Mathematiker Andrej N. Kolmogorow (1903 – 1987) war einer der Begründer der Komplexitätstheorie. Dieser sehr hübsche Zweig der Informationstheorie hält leider für uns eine schlechte Nachricht bereit: Ein ideales Kompressionsprogramm würde unendlich lange Zeit brauchen, um seine Aufgabe zu erfüllen. So viel Geduld hatten wir nicht; daher entschieden wir uns für einen speziellen Kompressionsalgorithmus namens GenCompress, den Xin Chen an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara entwickelt hat. GenCompress ist für Genome ausgelegt und funktioniert dafür gut. Wie wir sehen werden, ist er für Kettenbriefe ebenso geeignet.

Für jedes Paar von Kettenbriefen berechnet das Programm GenCompress ohne weiteren Eingriff einen Ähnlichkeits- oder auch Verwandtschaftsgrad.



Der Stammbaum der Kettenbriefe



Aus den Verwandtschaftsbeziehungen unter den 33 (willkürlich nummerierten) Exemplaren der Kettenbrief-Sammlung wurde dieser Stammbaum rekonstruiert. Einige der bedeutenderen Mutationen sind an den Stellen angezeigt, an denen sie auftraten.

Der nach unserem automatisierten Verfahren erstellte Baum gibt die Abstammung der Kettenbriefe wieder. Bei Punkt A wurde die Phrase »provided you in turn send it on« (»vorausgesetzt, du schickst ihn weiter«) aufgenommen. Bei Punkt B entstand ein neuer Titel: »And all things whatever ye shall ask in prayer, believing, ye shall receive.« (Matthäus 21, Vers 22: »Und alles, was ihr bittet im Gebet, so ihr glaubet, so werdet ihrs empfangen.«) Bei Punkt C mutierte der Titel weiter zu »With love all things are possible«. Außerdem veränderten sich an Punkt C »The Netherlands« zu »New England« und aus »General Welch« wurde »Gene Welch«. Der Satz »For no reason should it be broken« (»aus keinem Grund sollte [die Kette] unterbrochen werden«) ging verloren. Bei Punkt F mutierte der Titel zu »Kiss someone you love when you get this letter and make magic«.

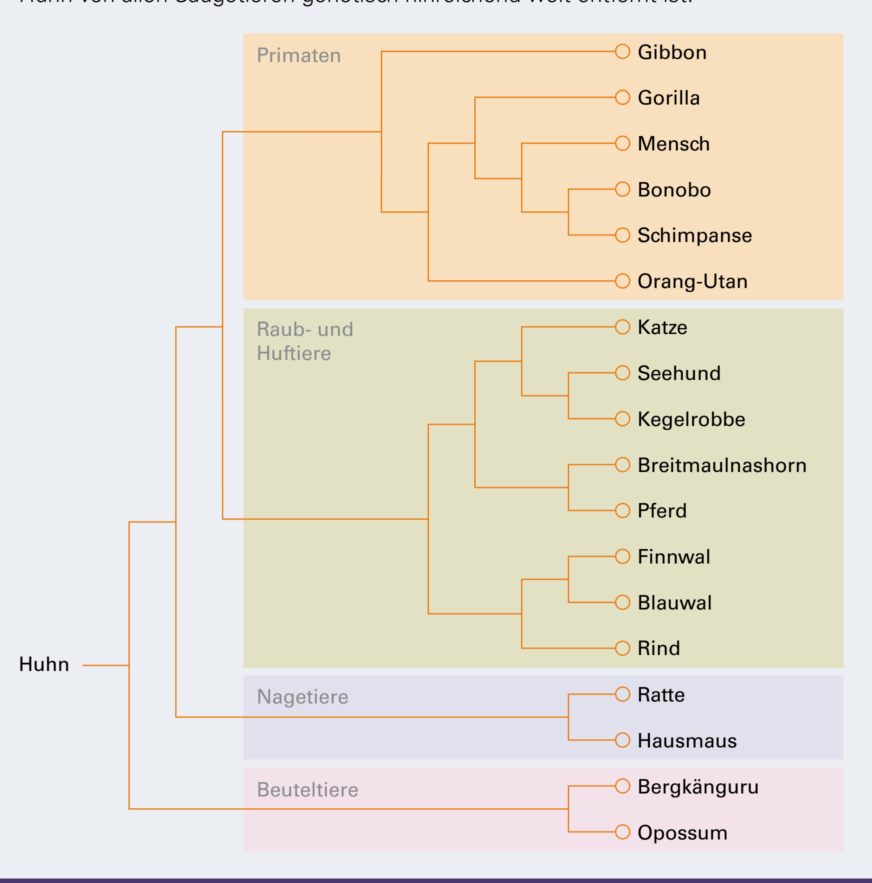
Nachdem wir unsere Analyse beendet hatten, fanden wir eine sehr interessante und eingängige Studie des Mathematikers Daniel W. VanArsdale über mehr als 460 Kettenbriefe verschiedener Art. Diese warf die Frage auf, welcher Titel zuerst kam, der mit »Kiss« oder der mit »Love«. Aufgrund unserer Daten vermuten wir, dass der »Love«-Titel zuerst da war. Denn in allen »Kiss«-Briefen (mit Ausnahme der Mutation bei G) empfing Gene Welch 7755 Dollar, während es in der »Love«-Gruppe 7755000 Dollar waren. In der Gruppe vor C war der Betrag 775000 Dollar. Die Mutationsfolge 775000 → 7755000 → 7755 ist offensichtlich plausibler (erfordert weniger Änderungsaufwand) als 775000 → 7755 → 7755000.

Bei Punkt D wuchsen die 70000 Dollar auf 470000 an, und »St. Jude« wurde in den Text aufgenommen. Weder der Betrag 470000 noch der Name St. Jude erscheinen außerhalb dieser Gruppe. Bei Punkt E fanden zwei interessante Veränderungen zugleich statt: Die Auto-Geschichte der Frau aus Kalifornien (»she was plagued with various problems including very expensive car repairs«) wurde hinzugefügt, und die Frau von Gene Welch überlebte das Eintreffen des Briefes um 51 statt sechs Tage. Dies trifft für alle Briefe in der Gruppe mit Wurzel E zu, außer für L28, der einer gesonderten Erklärung bedarf. Die Mutation »Auto und 51« erscheint nirgendwo außerhalb der Gruppe E.

L28 ist ein Beispiel für »horizontalen Transfer«: Die Information wird nicht nur von den Eltern an die Kinder vererbt, sondern auch unter den Kindern verschiedener Eltern ausgetauscht. In allen Briefen der Gruppe mit Wurzel D bekommt der Offizier der R. A. F. (Royal Air Force) 470000 oder 470 Dollar, mit Ausnahme von L28, wo der Betrag 70000 Dollar ist. L28 spricht außerdem von Gen. Welch, der sonst nur in Briefen vor Punkt C vorkommt. Alle Briefe in Gruppe D haben die Auto-Geschichte, und alle außer L21 und L28 haben die »51 Tage«-Mutation. Es ist kaum vorstellbar, dass L28 die beiden Mutationen »70000 Dollar« und »Gen. Welch« unabhängig von dem Auftreten dieser Mutationen spontan erworben hat. Man könnte die Mutation »Auto und 51« vor die Mutation »470000 Dollar und St. Jude« verlegen. Aber dann müsste L21 auf sehr unplausible Weise entstanden sein: Entweder müsste er die gesamte Auto-Geschichte verloren haben, und die »51 Tage« müssten sich in »sechs Tage« zurückverwandelt haben; oder er hätte sich die Merkmale »470000 Dollar« und »St. Jude« unabhängig von allen anderen Briefen zugelegt. Offensichtlich hat der Schreiber von L28 (oder L21) nach mehreren verschiedenen Quellen gearbeitet und ein fremdes Gen aus einem Brief vor C eingefügt.

Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Säugetieren

Verschiedenartige Probleme können mit dem Verwandtschaftsmaß der Autoren untersucht werden. Angewandt auf das komplette mitochondriale Genom erzeugte es diesen Stammbaum von Säugetieren. Insbesondere stellt es die Primaten näher zu den Raub- und Huftieren (Ferungulaten) als zu den Nagetieren – was allgemein als korrekt gilt. Als Wurzel des Baums und auswärtiger Vergleichsmaßstab dient das Huhn – nicht, weil die Säugetiere von den Hühnern abstammten, sondern weil das Huhn von allen Säugetieren genetisch hinreichend weit entfernt ist.



▷ Der nächste Schritt, diese Daten in einen Stammbaum zu verwandeln, geht ebenfalls größtenteils automatisch vonstatten; es gibt viele Software-Pakete für diesen Zweck. Das Ergebnis ist entweder ein einfaches Baumschema, das die Anordnung der Verzweigungen qualitativ wiedergibt (Kästen oben und auf Seite 81) oder aber ein detaillierteres Diagramm mit Zweigen, deren Länge der Entfernung, das heißt Unähnlichkeit, zwischen den Endpunkten des Zweigs entspricht.

Das einzig Wesentliche, was in dieser automatisch ablaufenden Prozedur der Mensch noch zu tun hat, ist festzulegen, welcher unter den Knoten (»Astgabeln«) dieses Baumes die Wurzel sein soll, also die Zeichenkette (oder Basensequenz), die zu dem hypothetischen gemeinsamen Vorfahren aller Briefe (oder Tierarten) gehört. Bei biologischen Stammbäumen kann man in der Regel unterstellen, dass dieser gemeinsame Vorfahr vor Millionen Jahren ausgestorben ist, also ist es wenig sinnvoll zu postulieren, er sei mit einem heute lebendem Organismus nahe verwandt.

Entsprechend sollte in unserer Kettenbriefstudie die Wurzel in der Nähe eines der frühen Exemplare liegen. Leider haben wir bei den meisten Briefen weder das Eingangsdatum notiert noch den Poststempel aufbewahrt; das Projekt hatte ja als Hobby angefangen und entwickelte sich erst später zu wissenschaftlicher Forschung. Aber einige Briefe waren mit einem frühen Zeitpunkt datiert, darunter L15; in dessen Nähe legten wir die Wurzel.

Es scheint, dass der Baum, den wir für unsere Kettenbriefe erschlossen haben, fast perfekt ist in dem Sinne, dass Dokumente mit gleichen Merkmalen stets zusammen gruppiert sind. Mit seiner Hilfe konnten wir zahlreiche Hypothesen über die Evolution der Briefe aufstellen.

Der Stammbaum von St. Jude

Erstens sind wahrscheinlich die Briefe, die vor Punkt C in unserem Stammbaum (Kasten Seite 81) liegen, die ältesten. Das Hauptindiz dafür ist, dass die meisten Mutationen des Namens »Carlo Dadditt« und des Brieftitels in dieser Gruppe von Briefen auftreten. In der Frühzeit wurde noch mehr abgeschrieben als fotokopiert, was die höhere Mutationsrate der ältesten Briefe erklärt. Außerdem sind unter den 14 datierten Briefen die beiden, die im Baum vor C liegen, nämlich L4 und L15, die ältesten. Schließlich sind die Briefe aus der Gruppe vor C sämtlich mit frommen Sprüchen betitelt, kommen aus »den Niederlanden« und enthalten den Satz »For no reason should it be broken«.

Zweitens finden wir einen Effekt aus der Genanalyse wieder, nämlich dass verschiedene Teile des Genoms sehr unterschiedliche Mutationsraten aufweisen. Das aktive Zentrum eines Enzyms verändert sich kaum, während Teile, die weit vom aktiven Zentrum entfernt sind, fortwährend zufälliger Drift ausgesetzt sind. Entsprechend ändern sich die Teile eines Kettenbriefs, die für sein »Überleben« erforderlich sind, überhaupt nicht; eher willkürliche Teile wie etwa das Unglück, das die Nicht-Weitersender zu treffen droht, mutieren dagegen häufiger. Am raschesten ändern sich die Teile, denen man mangels erkennbarer Bedeutung einen Fehler nicht ansieht, insbesondere ausgefallene Namen wie »Gem Walsh« oder »Carlo Craduit«.

Drittens gibt es wie im biologischen Vorbild parallele, kompensierende Mutationen. Das sind zwei Mutationen, die jede für sich schädlich sind und gemeinsam auftreten müssen, um neutral oder vorteilhaft zu sein. Abgesehen von L12 und L26, in denen niemand stirbt, gilt Folgendes: Alle Briefe vor Punkt C – mit Ausnahme der nächsten Verwandten von L29 – erzählen, dass General Welsh (oder so ähnlich) »lost his life … however before his death …«. Dagegen heißt es in Briefen nach Punkt C: Gene Welch

(oder so ähnlich) »lost his wife … however before her death …«. Wenn der Held schon die Ehefrau statt des eigenen Lebens verliert, dann muss der Millionengewinn vor ihrem statt vor seinem Tod eintreffen; sonst macht der Satz keinen Sinn mehr. Weitere Beobachtungen dieser Art sind im Kasten auf Seite 81 zu finden.

Über die Analyse von Kettenbriefen hinaus wurde unser Verwandtschaftsmaß in vielen anderen Bereichen eingesetzt. In der Bioinformatik haben wir damit die Mitochondrien-Genome von 18 Säugetierarten untersucht. Mitochondrien sind Energie produzierende Organellen innerhalb der Zellen, deren Gene ausschließlich über die mütterliche Linie vererbt werden (ähnlich wie ein Kettenbrief auch nur von einem einzigen »Elternteil« abstammt). Da kein Austausch von mütterlichen und väterlichen Genen stattfindet, häufen sich Mutationen in der Generationenfolge ungestört an. Diese Anhäufung wirkt wie eine Uhr, die misst, wann die Vorfahren eines Organismus sich von verwandten Arten abgespalten haben.

Säugetiere und abgeschriebene Hausaufgaben

Traditionelle Methoden, auf verschiedene mitochondriale Gene angewandt, liefern häufig unvereinbare Ergebnisse. Auf ganze Genome sind sie – im Gegensatz zu unserem Verfahren – nicht anwendbar, weil sie zum Beispiel Translokationen nicht richtig erfassen. So ergibt die Anwendung traditioneller Methoden auf ein halbes Dutzend mitochondrialer Gene, dass die Primaten (darunter wir selbst) näher mit den Nagetieren verwandt sind als mit den Ferungulaten (Raub- und Huftieren), einer großen Gruppe, die Rinder, Pferde, Wale, Katzen und Hunde umfasst. Mit einem anderen halben Dutzend Gene kommt man zu dem Ergebnis, dass Primaten und Ferungulaten das näher verwandte Paar sind, was allgemein als richtig gilt, da viele andere Indizien wie nicht-mitochondriale Gene und Fossilien in dieselbe Richtung weisen. Unser Verfahren, angewandt auf das komplette Mitochondrien-Genom, erzeugt den letztgenannten Stammbaum, ohne dass man Mehrdeutigkeiten oder Widersprüche durch irgendwelche Hilfskonstruktio nen wegdiskutieren müsste (siehe Kasten links).

Dario Benedetto, Emanuele Caglioti und Vittorio Loreto von der Universität »La Sapienza« in Rom trieben die Kunst der Stammbaumrekonstruktion zu einem verwegenen Extrem: Sie erstellten einen Stammbaum menschlicher Sprachen, nicht etwa auf dem klassischen Wege, sondern einfach indem sie ein Verfahren ähnlich dem unseren auf 52 Übersetzungen der »Allgemeinen Erklärung der Menschenrechte« anwendeten. Gemessen an dem extrem kargen Datenmaterial war das Ergebnis überraschend gut. Ein bemerkenswerter Fehler war die Einordnung von Englisch unter die romanischen Sprachen, nahe beim Französischen, wo doch Englisch zur germanischen Sprachfamilie zählt. Das ist dadurch zu erklären, dass das Englische nach der Eroberung Britanniens durch die Normannen zahlreiche französische Wörter übernommen hat (ein Beispiel von horizontalem Transfer).

Eine weitere Anwendung unseres Maßes war es, zu überprüfen, ob Studenten ihre Hausaufgaben voneinander abgeschrieben hatten. In einem Fall kennzeichnete unser Programm zwei Lösungen einer Aufgabe zur Computerprogrammierung als ungewöhnlich ähnlich; dagegen konnte der Lehrer, der sich die Arbeiten selbst ansah, keine offensichtlichen Anzeichen von Abschreiben entdecken. Die beiden Studenten wurden daraufhin angesprochen, und ihnen wurde – im Interesse der Forschung – Straffreiheit zugesichert, wenn sie ehrlich sagten, ob sie zusammengearbeitet hätten. Offenbar hatten die beiden die Aufgabe und mögliche Lösungswege diskutiert, aber darüber hinaus nicht zusammengearbeitet. Wenn das stimmt, dann hat unser Abstandsalgorithmus die kaum merklichen Ähnlichkeiten aufgespürt, die durch die Diskussion zu Stande gekommen waren!

Dass unser Verfahren so automatisch abläuft, ist sowohl ein Vorteil als auch ein Nachteil. Einerseits liefert es objektive Antworten frei von jeder Willkür. Man muss nicht entscheiden, ob DNA-Untersuchungen ein größeres Gewicht bekommen sollen als Fossilienfunde, oder Vermutungen darüber anstellen, welche Teile des Genoms am schnellsten mutieren. Wenn man andererseits derartige Erkenntnisse hat, kann das Verfahren sie auch nicht nutzen.

Alle Methoden der Stammbaumrekonstruktion sind unvollkommen und liefern gelegentlich falsche Ergebnisse. Wie die Historiker und die Paläontologen haben die Molekularbiologen, die sich mit Evolution beschäftigen, mittlerweile akzeptiert, dass die volle Wahrheit über die Vergangenheit niemals rekonstruiert werden kann, einerlei wie viele Indizienketten man betrachtet. Dies gilt besonders für ausgestorbene Arten, von denen man viele niemals kennen lernen wird, weil sie weder Fossilien noch lebende Nachfahren hinterlassen haben. Viele Sprachen sind im Wortsinne spurlos verschwunden, selbst noch im vergangenen Jahrhundert.

Zweifellos sind auch ganze Familien von Kettenbriefen schlicht ausgestorben, weil zu viele Empfänger die Kette abbrachen. Tragen wir's mit Fassung. Die Welt wird es eher verschmerzen als den Verlust zahlreicher Theaterstücke von Sophokles, bei denen sich auch nicht genügend Leute die Mühe machten, sie beizeiten abzuschreiben. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Charles H. Bennett (links) ist IBM-Fellow in der Forschungsabteilung der Firma in Yorktown Heights (Bundesstaat New York). Sein Forschungsschwerpunkt ist die Physik der Informationsverarbeitung; er ist einer der Entdecker der Quanten-Teleportation. **Ming Li** (Mitte) beschäftigt sich als Informatik-Professor an der Universität von Waterloo (Ontario, Kanada) mit Bioinformatik und Kolmogorow-Komplexität. **Bin Ma** arbeitet als Assistenzprofessor an der Universität von West-Ontario über Bioinformatik und Algorithmenentwurf. Die Arbeit der Autoren über Kettenbriefe wurde dadurch ausgelöst, dass Bennett Li während einer Wanderung in den Bergen von Hongkong von seiner Sammlung erzählte.

Molekulare Evolution. Von Arndt von Haeseler und Dorit Liebers. Fischer, Frankfurt am Main 2003

An introduction to Kolmogorov complexity and its applications. Von Ming Li und Paul M. Vitányi. Springer, 1997

An information-based sequence distance and its application to whole mitochondrial genome phylogeny. Von Ming Li et al. in: Bioinformatics, Bd. 17, Nr. 2, S. 149, Februar 2001

Language trees and zipping. Von Dario Benedetto, Emanuele Caglioti und Vittorio Loreto in: Physical Review Letters, Bd. 88, Nr. 4, S. 048702-1; 28. Januar 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Der zwiespältige Erfolg der Brüder Wright

Vor hundert Jahren konstruierten und erprobten die beiden Luftfahrtpioniere das erste steuerbare Motorflugzeug. Doch im zwanghaften Bemühen, ihre Erfindung vor der Konkurrenz geheim zu halten, setzten sie ihren Ruhm aufs Spiel.

Von Daniel C. Schlenoff

Am 17. Dezember 1903 hob Orville Wright in einem motorgetriebenen Flugzeug vom Boden ab. Nach nur 12 Sekunden beendete eine unsanfte Landung den knapp vierzig Meter weiten Luftsprung. Ein Jahrhundert später feiern wir das Datum als Meilenstein der Luftfahrt. Doch mit diesem Flug allein ist der Ruhm der Brüder Wright eigentlich kaum zu begründen. Andere Erfinder waren bereits vor ihnen weiter geflogen – und härter gelandet.

Es dauerte noch zwei Jahre, bis die Brüder Wright das erste wirklich steuerbare Flugzeug bauten und flogen. Leider hielten sie ihre verbesserte Maschine im Bestreben, sie Gewinn bringend zu vermarkten, so lange geheim, dass nicht nur »Scientific American« und andere zeitgenössische Publikationen skeptisch wurden, sondern auch die Fachwelt und die breite Öffentlichkeit.

Andere Bewerber um den Ruhm, das erste Flugzeug der Welt gestartet zu haben, brachten nur kurze oder unkontrollierte Flüge zu Wege. Der Franzose Clément Ader durfte sich 1890 des ersten Starts mit Propellerantrieb rühmen. Aber sein dampfgetriebenes Vehikel erhob sich nur zwanzig Zentimeter über den Boden, und selbst glühende Patrioten mussten beide Augen zudrücken, um darin einen Flug zu sehen. Gustav Weißkopf aus Deutschland konnte als Gustave Whitehead packend von seinen Flügen in den USA erzählen, aber ob er je ein funktionierendes Flugzeug gebaut hat, bleibt unter Luftfahrthistorikern umstritten. In Neuseeland ist man stolz auf Richard Pearse: Im März 1903 flog dieser eigenbrötlerische, exzentrische Farmer sein Fluggerät aus Bambus und Leinwand knapp 140 Meter weit, bevor er in eine Dornenhecke krachte. Sein Beispiel zeigt mit geradezu schmerzhafter Deutlichkeit, wie nötig in der Luftfahrt eine Steuervorrichtung ist.

Im September 1901 erklärte Wilbur Wright in einem Vortrag vor der Western Society of Engineers in Chicago, das größte Hindernis für ein brauchbares Flugzeug sei »das Balancieren und Steuern der Maschine, nachdem sie wirklich fliegt«. Die Wrights gaben darum der Flugsteuerung oberste Priorität. Sie erkannten auch, dass ein Pilot das Fliegen – wie ein Radfahrer das Balancieren auf zwei Rädern – eigens lernen muss.



Wilbur Wright (links) und sein Bruder Orville waren Drucker, Fahrradmechaniker – und Erfinder motorgetriebener Flugzeuge.

Flugsteuerung durch Verwinden der Tragflügelspitzen

Die Brüder Wright studierten Berichte über den deutschen Ingenieur Otto Lilienthal, der als erster Flieger der Welt gelten darf. Lilienthal unternahm Tausende Flüge mit raffinierten Hängegleitern, die er nach dem Vorbild von Vogelschwingen konstruierte; er steuerte durch Verlagern des Körpers, wie heutige Drachenflieger. Allerdings starb er 1896 bei einem Absturz, und die Wrights beschlossen, eine bessere Steuerung zu entwickeln, die sich auch für größere Flugzeuge mit Motor eignen sollte. Sie dachten an ein gegenläufiges Verwinden der Tragflügelspitzen während des Flugs, um die Maschine im Gleichgewicht und auf Kurs zu halten.

Im August 1899 nahmen die Wrights Urlaub von ihrem profitablen Fahrradgeschäft in Dayton (Ohio) und konstruierten einen kleinen Doppeldecker mit 1,5 Meter Spannweite, um ihre Ideen am Modell zu erproben. Das Gerät schwebte wie ein Spielzeugdrachen an Drähten, mit denen die Flügel ein wenig verdrillt werden konnten. Ein »Elevator« – ein kleiner, vor den Hauptflügeln angebrachter zusätzlicher Tragflügel – sollte stabilisierend wirken und das Kippen (Auf-

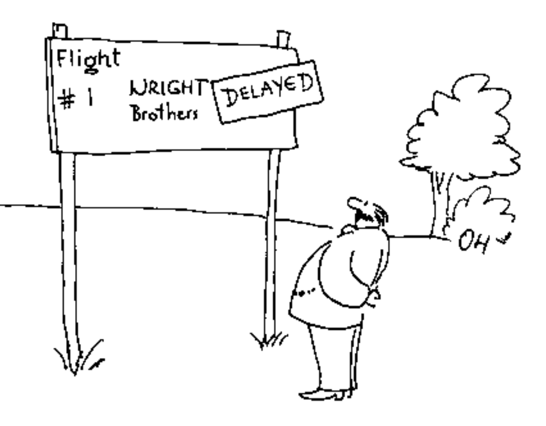

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCIV, NO. 9, 29. AUGUST 1908

Am 8. August 1908 wurde ein Flugzeug der Brüder Wright zum ersten Mal der Öffentlichkeit vorgeführt. Wilbur flog das »Modell A« auf der Rennstrecke von Le Mans (Frankreich) und bewies, dass es allen damaligen Konkurrenten weit überlegen war.

und Abwärtsrotieren um die Querachse) verhindern. Die ersten Resultate waren so ermutigend, dass die Brüder im folgenden Jahr eine vergrößerte Version mit einer Flügelfläche von gut 15 Quadratmetern bauten.

Dieses Modell transportierten sie nach Kitty Hawk auf den Outer Banks von North Carolina, wo eine gleichmäßig steife Brise vom Atlantik landeinwärts blies; sanft gewellte Sanddünen boten freien Raum und weiche Landungen. Die Wrights waren mit den Ergebnissen ihrer Versuche so zufrieden, dass sie 1901 mit einem noch größeren Gleiter wiederkamen – aber diesmal kehrten sie nach Dayton eher beunruhigt vom aerodynamischen Verhalten des Modells zurück, das sie sich anhand der zeitgenössischen Fachliteratur nicht erklären konnten. Um die Flügelkonstruktion zu verbessern, erprobten sie mehr als sechzig Modellquerschnitte in einem selbst gebauten Windkanal.

Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen ging der Gleiter von 1902 hervor. Seine Flügel waren länger und schmäler; außerdem trug er zusätzlich einen doppelten vertikalen Schwanzflügel, um das so genannte Gieren (Seitwärtsdrehungen um die vertikale Achse) zu kontrollieren. Der Pilot lag flach auf dem Bauch in ei- ▷



▷ ner Hüftwiege, und seine eigene seitliche Bewegung zog Drähte, welche die Flügel verdrillten und so die Flugrichtung steuerten. Im Spätsommer und Herbst verbrachten beide Brüder auf diese Weise in Kitty Hawk viele Segelflugstunden.

Erste Luftsprünge mit einem motorgetriebenen Fluggerät

Nachdem sie nun wussten, wie man ein antriebsloses Luftfahrzeug konstruiert und steuert, machten sie sich daran, eine robustere motorisierte Version zu schaffen. Da die meisten Automobilmotoren zu schwer waren, entwarfen sie selbst einen Motor und verwendeten dafür eine Aluminium-Kupfer-Legierung.

Um die optimale Propellerform auszutüfteln, führten sie wieder Windkanaltests durch, wobei sie den Propeller als kleinen rotierenden Flügel behandelten. Ihre Konstruktion hatte einen Wirkungsgrad von fast siebzig Prozent, nur zehn Prozent weniger als moderne Versionen. Sie brachten zwei Propeller hinten am Flugzeug an (siehe Bild) und ließen sie gegenläufig rotieren, um unerwünschte Drehmomente auszugleichen.

Am 17. Dezember 1903 setzten die Brüder Wright ihren »Flyer 1« auf eine Startschiene im flachen Sand der Kill Devil Hills bei Kitty Hawk. Durch einen Münzwurf wurde entschieden, dass zuerst Orville ins Flugzeug kletterte. Die beiden starteten den Motor, und während Wilbur mitlief und den Flügel hielt, hob die Maschine ab – aber nur kurz. Es ist Ansichtssache, ob der erste Versuch des Tages ein kontrollierter Flug war oder ein Hopser; aber der vierte und letzte, mit Wilbur am Steuer, war ein eindeutiger Erfolg: 260 Meter durch die Luft in 59 Sekunden. Die Wrights hatten mit einem motorgetriebenen Apparat, der schwerer als Luft war, einen freien, gesteuerten, ununterbrochenen Flug zu Stande gebracht. Neun Tage später meldete »Scientific American« zurückhaltend: »Dies ist ein deutlicher Fortschritt in der Luftnavigation mit Aeroplanen.«

Die Wrights waren zwar triumphale Flugzeugerfinder, aber leider schrecklich schlechte Geschäftsleute der Luftfahrtbranche. Sie waren so ängstlich bestrebt, die finanzielle Kontrolle über ihre Erfindung zu behalten, dass sie ihr Gerät nicht nur vor den neugierigen Augen der Konkurrenz verbargen, sondern auch vor möglichen Kunden und all denen, die ihren Erfolg in die Öffentlichkeit hätten tragen können. Sogar als sie nach dreijähriger Wartezeit im Mai 1906 das Patent Nummer 821 393 zugesprochen bekamen, glaubten sie nicht, dadurch wirklich geschützt zu sein – womit sie übrigens Recht hatten.

Nach Dayton zurückgekehrt, arbeiteten die Brüder auf dem Gelände Huffman Prairie an einer verkäuflichen Flugmaschine. Mit ihrem »Flyer 2« machten sie mehr als hundert kurze Flüge und benutzten später ein Katapult, um den Start zu erleichtern. Sie mieden weiterhin das Rampenlicht – sehr zum Ärger von Luftfahrt-Enthusiasten, die durch allerlei Andeutungen hellhörig geworden waren. Im Juni 1904 beschwerte sich »Scientific American« über die kargen Gerüchte aus Dayton: »Aus dem Test wurde ein großes Geheimnis gemacht, und kaum jemand war Zeuge.«

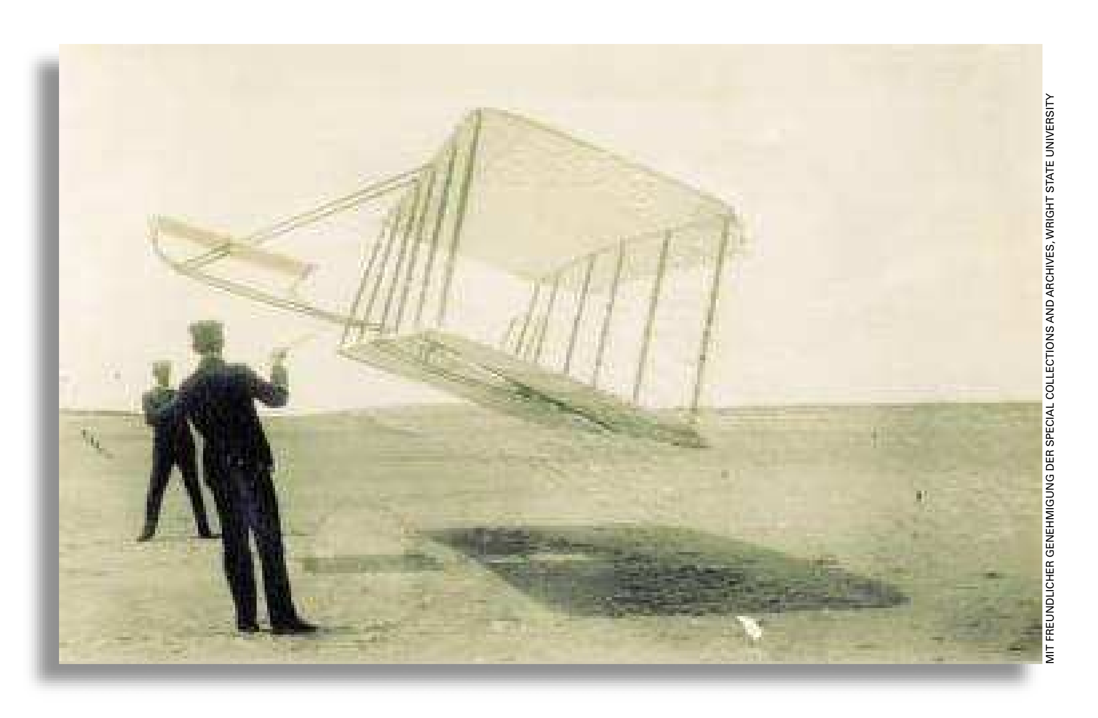
Es gab zumindest einen Zeugen. Amos Ives Root schrieb darüber am 1. Januar 1905 einen Artikel in seinem Magazin »Gleanings in Bee Culture« (etwa: Nachlese der Bienenzucht). Root behauptete, »Scientific American« habe seinen Artikel nicht drucken wollen. Vielleicht war den Redakteuren der Stil zu blumig. Der Bericht in »Bee Culture« beginnt so: »Ich möchten Ihnen eine wunderbare Geschichte erzählen – eine Geschichte, die in gewisser Hinsicht die Märchen aus tausendundeiner Nacht in den Schatten stellt – eine Geschichte mit einer Moral, die, wie ich meine, viele der Jüngeren brauchen und vielleicht auch einige der Älteren, wenn sie nur ein Ohr dafür haben.«

Flyer 2 und Flyer 3 waren so schwer zu steuern wie der Kitty-Hawk-Flyer, und oft gab es harte Landungen – was allen, die moderne Nachbauten versuchen, eine Warnung sein sollte. Eine Bruchlandung im Juli 1905 zwang die Wrights zu einem radikalen und sehr vorteilhaften Umbau des Flyer 3. Sie vergrößerten die Steuerflächen und platzierten sie weiter weg vom Schwerpunkt. Am 5. Oktober 1905 flog Wilbur damit in 39,5 Minuten fast vierzig Kilometer weit.

Die Gebrüder Wright hatten das erste wirklich brauchbare Flugzeug der Welt entwickelt und ihren Status als Luftfahrtpioniere fest etabliert. Doch diese Ehre verlieh ihnen erst im Nachhinein die Geschichte, denn die Brüder erlaubten kaum jemandem, die Maschine im Flug zu beobachten oder zu fotografieren. Erst 1990 wurde der Flyer 3 offiziell unter die Nationalen Historischen Wahrzeichen der USA aufgenommen – das einzige Flugzeug, dem diese Ehre je zuteil wurde.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
SCIENTIFIC
AMERICAN

◀ Eine fotorealistisch gemalte Teilansicht des »Flyer« von 1903 mit einem der zwei 2,6 Meter langen Propeller zierte 1979 die September-Ausgabe von Spektrum der Wissenschaft.



Die Wrights erprobten zunächst einfache Fluggeräte in mehreren Modellstufen. Auf diesem über hundert Jahre alten Foto experimentierten sie 1901 mit einem Drachengleiter bei Kitty Hawk (North Carolina).

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER SPECIAL COLLECTIONS AND ARCHIVES, WRIGHT STATE UNIVERSITY

Die Brüder boten das Flugzeug abwechselnd dem amerikanischen Militär, den Franzosen, den Briten und den Deutschen zum Kauf an. Aber zugleich weigerten sie sich, die Flugeigenschaften vor Unterzeichnung eines Kaufvertrags zu demonstrieren. Natürlich scheuten potenzielle Kunden davor zurück, ein so neuartiges Gerät zu kaufen, ohne zu sehen, ob es funktionierte.

Schwindender Ruhm

Da es »Scientific American« nicht gelang, zusätzliche Informationen von den Wrights oder über sie zu bekommen, hieß es in einem Artikel vom Januar 1906 argwöhnisch: »Wie es scheint, wurden diese angeblichen Experimente in Dayton, Ohio, einer recht großen Stadt gemacht, ohne dass die sonst so wachsamen Zeitungen der Vereinigten Staaten von diesen sensationellen Darbietungen Notiz nahmen.«

Die Franzosen nannten die Wright-Brüder »*bluffeurs*«. Ein deutsches Fachjournal bezeichnete ihre Flüge als »amerikanischen Bluff«. Doch die Wrights hielten ihr Fluggerät trotz allem noch immer nicht für genügend ausgereift, um es herzuzeigen.

Unterdessen führte der Brasilianer Alberto Santos-Dumont in Frankreich den ersten öffentlichen Motorflug vor. Er startete am 12. November 1906 und flog 220 Meter weit. Mangels eines Gegenbeweises wurde er als der erste Flugzeugpilot gefeiert. Seine Landsleute verehren Santos-Dumont noch heute als den »Vater der Luftfahrt«.

Um den Fortschritt der Flugzeugtechnik zu fördern, stifteten der Aero Club of America und »Scientific American« 1907 einen Preis für den ersten Menschen, der sich in die Luft erheben und einen Kilometer geradeaus fliegen würde. Die Wrights waren nur hinter Kaufverträgen her und beteiligten sich nicht. Glenn Hammond Curtiss und die Aerial Experiment Association, unterstützt von dem Erfinder Alexander Graham Bell, nahmen teil und gewannen die Trophäe mit einer triumphalen Darbietung ihres Flugzeugs »June Bug« am 4. Juli 1908. Wegen dieser Leistung und der Bekanntheit von Curtiss als Flugpionier glaubten in den USA viele, er sei als erster Mensch geflogen.

Die Wrights warteten, bis sie sowohl das Signal Corps der US-Army als auch eine französische Firmengruppe als Käufer in Aussicht hatten, bevor sie ihre Maschine endlich der Öffentlichkeit präsentierten. Am 8. August 1908 startete Wilbur auf der Rennstrecke von Le Mans (Frankreich) in einem »Model A Flyer«. Er verblüffte die Zuschauer durch ungeahnte Flugtechnik, und die Wrights wurden als Helden gefeiert.

1909 erreichten die Brüder den Gipfel ihres Ruhms. Im Herbst jenes Jahres sah eine Million gebannter Zuschauer zu, wie Wilbur über den New Yorker Hafen und um die Freiheitsstatue kurvte. Wenige Tage darauf erlebte eine ähnlich große Menge, wie er den Hudson River flussaufwärts flog.

Doch die Entwicklung der Luftfahrt überholte die Wrights rapide. Immer mehr Geld und Erfindungsgeist floss in den faszinierenden neuen Industriezweig: Schon 1911 stellten mehrere Firmen vor allem in Europa Flugzeuge her, die sicherer, schneller und manövrierfähiger waren als die Maschinen der Wrights.

Nachdem Wilbur 1912 an Typhus gestorben war, musste Orville allein gegen die wachsende Konkurrenz ankämpfen und umständliche patentrechtliche Streitigkeiten ausfechten. Im Jahre 1915 hatte er das Geschäft mit der Fliegerei satt und setzte sich zur Ruhe. Doch er hörte nie auf, den Ehrenplatz in der Geschichte der Luftfahrt zu verteidigen, der ihm und seinem Bruder gebührt. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Daniel C. Schlenoff ist als Redakteur bei Scientific American für die Rubrik »50, 100 & 150 Years Ago« zuständig.

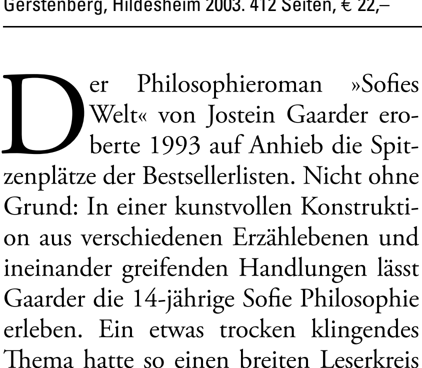
Das erste Motorflugzeug. Von F. E. C. Culick, Spektrum der Wissenschaft 9/1979, S. 116.

Die Flugzeug-Steuerung der Brüder Wright. Von Frederick J. Hooven in: Spektrum der Wissenschaft 1/1979, S. 70.

Visions of a Flying Machine: The Wright Brothers and the Process of Invention. Von Peter L. Jacob. Smithsonian Books, Washington 1997.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

REZENSIONEN



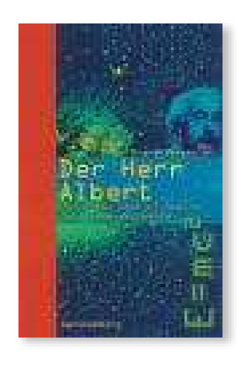
PHYSIK

Frank Vermeulen

Der Herr Albert

Ein Roman über Einsteins Gedankenexperimente

Aus dem Niederländischen von Rolf Erdorf.
Gerstenberg, Hildesheim 2003. 412 Seiten, € 22,–



Der Philosophieroman »Sofies Welt« von Jostein Gaarder eroberte 1993 auf Anhieb die Spitzenplätze der Bestsellerlisten. Nicht ohne Grund: In einer kunstvollen Konstruktion aus verschiedenen Erzählebenen und ineinander greifenden Handlungen lässt Gaarder die 14-jährige Sofie Philosophie erleben. Ein etwas trocken klingendes Thema hatte so einen breiten Leserkreis gefunden: Populärwissenschaft vom Feinsten.

Knapp zehn Jahre später versucht sich Frank Vermeulen an einer Nachahmung. Seine Esther ist ein Jahr älter als Sofie und lernt ein ähnlich schwieriges Gebiet kennen: die Relativitätstheorie. Offensichtlich will der Autor mit dem gleichen Trick wie Gaarder Leser erreichen, die zwar gerne anspruchsvoll lesen, aber reine Sachbücher zu langweilig finden.

Esthers Lehrmeister sind ihr Großvater, den sie tagsüber besucht, und eine Traumgestalt namens Nils, die ihr nachts auf dem Porträt Einsteins erscheint, das sie zu ihrem 15. Geburtstag geschenkt bekommen hat. Esther brennt darauf zu verstehen, was das Besondere an Einsteins Theorie ist. Leider muss sie dazu aber erst die Grundlagen kennenlernen. Geduldig erklären ihr Nils und der Großvater die Fallgesetze Galileis, die Newton'sche Mechanik und den Begriff des Inertialsystems. Etwa in der Mitte des Textes lernt Esther die spezielle Relativitätstheorie und im letzten Fünftel sogar die allgemeine kennen.

Die Dialoge drehen sich zu einem großen Teil um die Gedankenexperimente, die zu den Relativitätstheorien führen: lange, schnell fahrende Züge und Beobachter am Bahnsteig, die Lichtsignale aussenden; fallende Aufzüge und beschleunigende Raketen im Weltall. Am Ende bemerkt Esther, dass sie auf diese Weise tatsächlich Einsteins Physik verstehen kann.

Gilt das auch für den Leser? Vermutlich nicht. Wahrscheinlich hält er gar nicht bis zur Mitte des Buches durch. Zu schwach ist die Rahmenhandlung, zu sehr liest sich das Buch als Physiksachbuch und zu wenig als Roman. Der Autor versäumt es, neben der Physik einen zweiten thematischen Bogen zu spannen. Obendrein wirken die Gespräche gekünstelt. So stellt Esther immer gerade die weiterführenden Fragen, die ein Lehrer sich wünschen würde. Und die Kernaussagen der Quantenphysik akzeptiert sie nach einer schlichten halben Seite Text. So bleibt dem Leser nur, staunend Esthers »Albertisierungsprozess« zu verfolgen – was zugleich auch das Unwort des Buches ist.

Auch der hartnäckige Albert-Fan wird seinen Entschluss weiterzulesen doch noch einmal überdenken, wenn er auf die in den Fließtext eingearbeiteten mathematischen Herleitungen stößt. Nichts gegen $E = mc^2$; diese Formel gehört in ein Buch über die Relativitätstheorie und wird vom Autor auch gut erklärt. Aber: »Der Wert … ist demnach $(7T)^2 - (7^*0.99\,cT)^2/c^2$ … Wir können durch c kürzen, 7^2 nach vorne bringen, und es bleibt übrig: $T^2\,7^2\;(1-0.99^2)$. Und das ist tatsächlich gleich T^2, … denn 7 ist eigentlich 7.0888.« Wem soll eine solche Textpassage etwas bringen?

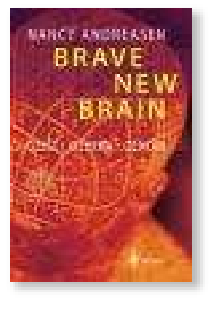
Die Handskizzen, die illustrieren sollen, was Einstein in Gedanken durchspielte, ähneln fatal den mehr erschreckenden als erklärenden Tafelbildern aus dem Physikunterricht. Manchmal sind sie nicht nur lieblos, sondern auch didaktisch ungeschickt, etwa wenn eine Sonne in einem Koordinatensystem dreißig Meter neben den Ursprung gezeichnet wird und aus dem Text nicht unmittelbar hervorgeht, dass es sich nicht um die echte Sonne handelt, sondern nur ein Punkt durch Strahlen grafisch hervorgehoben wurde.

Fachlich irrt sich Vermeulen in einigen Punkten: Es gibt im Universum sehr wohl ein gegenüber allen anderen ausgezeichnetes Bezugssystem, nämlich das, in dem die Hintergrundstrahlung isotrop erscheint. Es ist auch unpräzise, wenn Nils behauptet: »Der Beobachter im fahrenden Zug sieht, dass die Messlatte des ruhenden Beobachters kürzer ist als seine eigene.« Um zu wissen, was ein Beobachter sieht, muss man neben der Längenkontraktion auch die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Sehstrahlen berücksichtigen, was kombiniert einen Gegenstand gedreht und nicht verkürzt aussehen lässt. Der Tübinger Astrophysiker Hanns Ruder hat dies in zahlreichen Computeranimationen verbildlicht und gezeigt, dass ältere Darstellungen zur Längenkontraktion irreführend sind.

»Der Herr Albert« verbraucht eine gute Idee. Anders umgesetzt hätte sie gute Chancen gehabt, viele Leser zu begeistern, wie »Sofies Welt« beweist. Vermeulens Nachahmung bleibt weit hinter dem Original zurück.

Stefan Gillessen

Der Rezensent promoviert in Astroteilchenphysik am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg.



HIRNFORSCHUNG

Nancy Andreasen

Brave New Brain

Geist – Gehirn – Genom

Aus dem Englischen von Karin und Dr. Markus Schwarz.
Springer, Berlin 2002. 430 Seiten, € 34,95

Die Anspielung auf »Brave New World« ist offensichtlich gewollt. Aber den grenzenlosen Fortschrittsglauben und Optimismus, den Aldous Huxley in seinem Klassiker so trefflich ad absurdum führte, vertritt die Autorin selbst von ganzem Herzen! Nancy Andreasen, Neurowissenschaftlerin, Herausgeberin des »American Journal of Psychiatry« und Trägerin der »National Medal of Science«, schreibt im Vorwort, ihr Buch handle »von der Erschaffung einer ›schönen, neuen Welt des Gehirns‹ « sowie »davon, wie die mächtigen Werkzeuge der Genetik und der Neurowissenschaften in den kommenden Jahrzehnten vereinigt werden, um gesündere, bessere und schönere Gehirne und Seelen zu schaffen«.



BILDBAND

Otto Potsch

Der Bernsteinmagier

Erstarrt in alle Ewigkeit

Präsentiert von Karin und Gunter Haug.
Gmeiner, Meßkirch 2003. 168 Seiten, € 29,90

Otto Potsch ist ohne Zweifel ein begnadeter Fotograf. Seine Makroaufnahmen von eigens angeschliffenem Bernstein gewinnen durch farbige Lichter und Hintergründe eine unglaubliche Lebendigkeit. Fast könnte man glauben, die vielen Spinnen, Fliegen und Schaben seien vollständig konserviert in der gelben Masse enthalten. Einige Tiere haben im Todeskampf noch mit den Flügeln gerudert und dabei eindrucksvolle Spuren hinterlassen.

Gegenüber den erstklassigen Bildern ist der Text eine herbe Enttäuschung. Kaum etwas zu den abgebildeten Tieren oder zur Entstehung des Bernsteins, fast nichts zur Präparations- und Aufnahmetechnik, dafür literarische Ergüsse des Fotografen und zahlreiche Lobpreise auf seine Person. Immerhin erfahren wir, dass Otto Potsch aus dem Weinviertel bei Wien stammt und es auch als Komponist, Bildhauer und Elfenbeinschnitzer zu Meisterschaft gebracht hat. Als Festrede zu seinem 60. Geburtstag wäre das akzeptabel gewesen.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

▼ Die Weichteile und Organe dieser Ameise sind längst von Bakterien zersetzt; nur der Chitinpanzer hat sich erhalten und reflektiert das farbige Licht.



Das irritiert. Aber die Verstörung legt sich bald, denn schon im ersten Kapitel nimmt Nancy Andreasen eine Position ein, die das genaue Gegenteil von Schwarz-Weiß-Malerei ist: Die heute noch so beliebten »falschen Gegensätze« wie psychisch gegen somatisch, Geist gegen Gehirn, Gene gegen Umwelt erschweren das Verständnis menschlichen Verhaltens und damit insbesondere auch psychischer Erkrankungen. Ein »Entweder-oder-Muster« hindert uns, die Dinge klar zu sehen und zu begreifen, während uns nur ein »Sowohl-als-auch-Denken« der richtigen Antwort näher bringt. »Der Verzicht auf diese falsche Gegensatzbildung ermöglicht uns ein viel besseres Verständnis davon, wie das Leben tatsächlich funktioniert« (Seite 42).

Im Folgenden schildert die Autorin sehr anschaulich den aktuellen Wissensstand über den Aufbau, die Struktur und die funktionellen Prozesse des menschlichen Gehirns. Man versteht heute das Gehirn nicht mehr als eine Ansammlung unterschiedlicher Zentren für bestimmte Funktionen wie Erinnern, Sprechen und Fühlen. Vielmehr gibt es im Geflecht seiner vielen weit verzweigten Schaltkreise zwar einige quasi-spezialisierte Regionen; aber keine von ihnen ist in der Lage, autonom, ohne gleichzeitige Aktivierung anderer Regionen, eine geistige oder körperliche Aktion durchzuführen. Neuere Erkenntnisse zeigen, dass das Gehirn auch des Erwachsenen von dynamischer Natur ist. Seine Struktur entwickelt und verändert sich ständig auf Grund physikalischer, chemischer und psychischer Einflüsse – was den medizinischen Eingriff angeht: sowohl durch Psychopharmaka wie durch Psychotherapie.

Ein Kapitel namens »Die Kartographie des Genoms« beschreibt Fortschritte in der Genetik. Die Gene diktieren nicht unserer Schicksal; vielmehr ist ihre Aktivität – die Genexpression – von den Umständen abhängig, denen sie ausgesetzt sind. Die dadurch bedingte Flexibilität ist »der Angelpunkt, an dem wir letztlich die neuen und wirkungsvollen ▷



Vier Altmeister der Psychiatrie auf einer Bootsfahrt im Jahre 1900. Von links: Alois Alzheimer, Emil Kraepelin, Robert Gaupp und Franz Nissl

Instrumente der Molekulargenetik und Molekularbiologie ansetzen können, um psychische und andere Erkrankungen zu behandeln und zu verhüten«. In dem anschließenden Kapitel »Die Kartographie des denkenden Gehirns« referiert die Autorin die beeindruckenden Erfolge der funktionellen Bildgebung, welche die Beobachtung des lebenden, funktionierenden Gehirns möglich gemacht haben.

Der zweite Hauptteil des Buches ist den »großen« psychiatrischen Erkrankungen gewidmet: der Schizophrenie, den affektiven Störungen, den Demenzen und den Angststörungen. Die Autorin gibt einen anschaulichen und umfassenden Überblick über die Symptomatik, die Fragen nach den Ursachen und zur Psychopharmakotherapie – allerdings ganz und damit einseitig aus der Sicht der biologischen Psychiaterin, auch wenn sie die Möglichkeit psychotherapeutischer Einflussnahmen erwähnt. Dabei wird deutlich, dass der bisherige Nutzen des zuvor dargestellten immensen Forschungsaufwandes für die therapeutische Praxis noch relativ gering ist.

Des ungeachtet lässt Andreasen zum Schluss ihren Fortschrittsoptimismus wieder zu Wort kommen, und das in einer sehr martialischen Sprache: »Wenn wir den Krieg gewinnen wollen, müssen wir wissen, welche Waffen geeignet sind und worauf wir sie richten müssen. Viele Jahre hindurch waren unsere Waffen primitiv: Gewehre, die die Munition streuten, Kanonen, die unpräzise und ungezielt schossen und Pfeile, die zu schwach waren, um das Ziel zu durchbohren … Die Techniken der Molekularbiologie werden uns die Fähigkeit zur präzisen und durchschlagenden Bombardierungen verleihen, während uns unsere Karten des Gehirns die Ziele dafür zeigen.«

Wieder einmal – so wie es eigentlich seit hundert Jahren geschieht – wird behauptet, dass wir unmittelbar vor dem großen Durchbruch stünden. Woher die Autorin diesen Optimismus bezieht, wird nicht recht erkennbar. Diesmal soll die nähere Untersuchung der Funktionsweise des Thalamus den Durchbruch zum Verständnis und zur Therapie zum Beispiel der Schizophrenie bringen. Ihre Formulierung ist nicht ohne unfreiwillige Komik: »Irgendwo in diesem kleinen Heuhaufen werden wir wohl die donquichottische Nadel finden, mit der wir einen der größten Giganten der psychischen Erkrankungen niederstrecken können.«

Trotz dieser Einschränkungen ist das Buch jedem zu empfehlen, der sich über den aktuellen biologischen Forschungsstand orientieren will. Das Buch ist hervorragend übersetzt und sorgfältig ediert. Zahlreiche Abbildungen und Tabellen veranschaulichen das Gesagte und geben einen guten Einblick in das Forschungsfeld der Hirnforscher, Neurobiologen und Genetiker.

Wilhelm Rotthaus

Der Rezensent ist ärztlicher Leiter des Fachbereichs Psychiatrie und Psychotherapie des Kinder- und Jugendalters der Rheinischen Kliniken Viersen.



HIRNFORSCHUNG

Harald Welzer

Das kommunikative Gedächtnis

Eine Theorie der Erinnerung

C. H. Beck, München, 2002. 246 Seiten, € 19,90

Erinnern ist nicht einfach das Abrufen von irgendwelchen Bildern, die in unserem Gehirn abgelegt sind, sondern eine komplexe und von vielen Faktoren beeinflusste Rekonstruktionsleistung. Die Forschung der letzten zwanzig Jahre hat uns zwischen verschiedenen Arten von Gedächtnis zu unterscheiden gelehrt (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 52): Mit Hilfe prozeduraler Gedächtnissysteme erschließen wir nichtbewusste Erinnerungen, zum Beispiel an die Bewegungsfolgen beim Schwimmen oder Autofahren, während deklarative Gedächtnissysteme uns erlauben, zurückliegende Erlebnisse und Ereignisse zu rekonstruieren und für das Alltagshandeln nutzbar zu machen. Zudem gewähren rasante Fortschritte im Bereich der funktionellen Bildgebung faszinierende Einblicke in die Gehirnsysteme, die zur Realisierung dieser unterschiedlichen Gedächtnisvorgänge beitragen.

Der Essener Sozialpsychologe und Soziologe Harald Welzer hat sich ein hohes Ziel gesteckt. Er will nicht nur, gestützt auf die neuesten Befunde der Neurowissenschaften, darstellen, wie unser Gedächtnis arbeitet, wie es sich im Laufe der Kindheit aus dem Wechselspiel von vererbten und Umwelteinflüssen entwickelt und welche Rolle Emotionen bei seinen Leistungen spielen. Sondern er will darüber hinaus diesen auf die Einzelperson zentrierten Forschungsansatz auf soziale Prozesse der Erfahrungsbildung erweitern und letztlich die «sozial-kommunikativen Mechanismen« verstehen, mit deren Hilfe wir unsere persönliche Vergangenheit rekonstruieren.

Welzer führt zunächst in die zentralen Befunde und Konzepte der Gedächt-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ **In den Kriegserzählungen der von ihm Befragten bekam Harald Welzer häufig Szenen zu hören, die eher einem Film (wie hier »Im Westen nichts Neues«) zu entstammen schienen als dem eigenen Erleben.**

▷ nisforschung ein. In anschaulicher Art und Weise arbeitet er die vier Grundformen des Langzeitgedächtnisses heraus: episodisches, semantisches, prozedurales Gedächtnis und das Bahnungs-(Priming-)System. Dass Erinnerungen weitgehend Rekonstruktionen sind, wird aus Untersuchungen deutlich, in denen Versuchspersonen vom Kontext aufwühlender Ereignisse wie der Ermordung des schwedischen Regierungschefs Olof Palme oder der «Challenger«-Katastrophe nach Jahren völlig andere Erinnerungen haben – und von ihrer Korrektheit überzeugt sind –, als sie kurz nach dem Ereignis zu Protokoll gaben.

Eine wichtige Rolle für das autobiografische Erinnern spielt der momentane emotionale Zustand einschließlich seiner körperlichen Manifestationen. Wir ändern also Erinnerungen, wenn wir sie ins Gedächtnis rufen, je nach Gemütslage immer wieder aufs Neue ab. Das wird bestätigt durch neuropsychologische Befunde an Patienten, bei denen die Verarbeitung emotional gefärbter autobiografischer Information selektiv beeinträchtigt ist.

Anhand von Interviewtexten und Gesprächsbeispielen wird aufgezeigt, dass unser lebensgeschichtliches Erinnern nicht ausschließlich auf selbst Erlebtem basiert. Die geschilderten Beispiele lassen die These, dass Information aus ganz unterschiedlichen Quellen, wie Kinofilme oder Erzählungen, in die eigene Lebensgeschichte eingebaut werden, plausibel erscheinen. Was letztendlich in die eigene Lebensgeschichte einfließt und was dabei identitätsstiftend ist, wird durch sozialkommunikative Konventionen bestimmt. Das «kommunikative Gedächtnis« Welzers ist demzufolge ein durch emotional gefärbte soziale Austauschprozesse entstandenes autobiografischen Gedächtnis.

Der Schlussteil des Buches basiert fast ausschließlich auf Plausibilitätsabwägungen und ist damit losgelöst von wissenschaftlichen Erklärungszusammenhängen. Hier wird deutlich, dass Welzer sein hoch gestecktes Ziel nicht erreicht hat. Seine Theorie des kommunikativen Gedächtnisses ist nicht eigentlich falsch, aber nutzlos. Sie erklärt nichts, was ohne sie nicht auch erklärt werden könnte. Insbesondere erlaubt sie keine empirisch prüfbaren Vorhersagen.

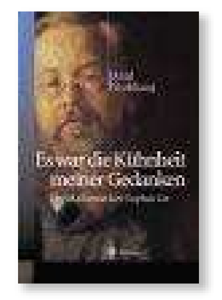
Unterliegen nicht Erinnerungen, die auf sozial-kommunikativen Prozessen basieren, denselben Mechanismen wie Erinnerungen an nicht kommunikativ vermittelte Ereignisse? Die ausgiebig zitierten Schilderungen eines DDR-Flüchtlings ein Jahr und zehn Jahre nach dem Ereignis weichen auffällig voneinander ab. Ist dieser Unterschied nicht ebenso durch Fehlkodierungen oder Quellenamnesien zu erklären wie unsere – ebenfalls fehlerhafte, aber nicht nennenswert kommunizierte – Erinnerung an ein besonders spannendes Buch oder ein beeindruckendes Gemälde? Sind nicht autobiografische Erinnerungen denselben empirischen Prüfungen zugänglich wie andere Formen des episodischen Erinnerns?

Seinem unterstützenswerten interdisziplinären Ansatz zum Trotz löst das Buch den Anspruch nicht ein, eine integrative Theorie eines biologischen und sozial verankerten autobiografischen Gedächtnisses zu liefern.

Nach meiner Überzeugung besteht die große Herausforderung an eine biologisch fundierte Theorie des menschlichen Gedächtnisses darin, zu verstehen, wie sich Gedächtnissysteme unter dem Einfluss natürlicher Auslese entwickelt und – in historischer Zeit – an veränderte soziale Umwelten angepasst haben. Ein solcher »sozial-neurowissenschaftlicher Ansatz« würde nicht nur die von Welzer konstruierte Spaltung zwischen einem individuumzentrierten und einem sozialzentrierten Forschungsansatz aufheben, sondern obendrein intersubjektive Erfahrungen einer neurowissenschaftlichen Untersuchung zugänglich machen.

Axel Mecklinger

Der Rezensent ist Professor für Psychologie und Leiter der Arbeitseinheit Experimentelle Neuropsychologie an der Universität des Saarlands in Saarbrücken.



WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Arild Stubhaug

Es war die Kühnheit meiner Gedanken

Der Mathematiker Sophus Lie

Aus dem Norwegischen von Kerstin Hartmann-Butt.
Springer, Berlin 2003. 578 Seiten, € 39,95

Der Norweger Sophus Lie (1844–1899) gilt als einer der brillantesten mathematischen Köpfe der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, einer Epoche, in der sich mathematische Sichtweisen entscheidend veränderten und die Grundlagen für heute dominierende moderne Konzepte gelegt wurden. Lie selbst legte mit seiner Theorie der »kontinuierlichen Transformationsgruppen« das Fundament für ein ganzes Wissensgebiet, das sich erst um

1930 als eigenständige mathematische Teildisziplin herauskristallisierte. Heute ist es als Theorie der Lie-Gruppen und Lie-Algebren eine tragende Säule der modernen Mathematik und gewinnt zunehmende Bedeutung in der modernen theoretischen Physik.

Gleichzeitig war Lie einer der widersprüchlichsten und schillerndsten Persönlichkeiten seiner Zeit. Noch heute kursieren über ihn zahlreiche skurrile Geschichten und Anekdoten, durch welche die tragischen Aspekte seines Lebens häufig in Vergessenheit geraten.

Der Pfarrerssohn zeigte schon früh einen ausgeprägten Ehrgeiz, ungewöhnliche Körperkräfte und einen ebensolchen Humor. Nach sehr gutem Schulabschluss und einem damals üblichen allgemein gehaltenen Studium der Naturwissenschaften entdeckte er seine Berufung zum Mathematiker erst relativ spät – mit 24 Jahren – und autodidaktisch. In den Jahren 1869/70 fand er den Anschluss an die internationale Forschung auf Reisen nach Berlin und Paris; dort lernte er unter anderem Felix Klein, einen der führenden deutschen Mathematiker des 19. Jahrhunderts, kennen und begann mit ihm eine über Jahre dauernde fruchtbare Zusammenarbeit.

In diesen Jahren, die in Norwegen als eine Zeit des kulturellen und politischen Umbruchs gelten, machte Lie auch durch ausgeprägtes soziales und politisches Engagement von sich reden. Führende Intellektuelle sorgten letztendlich dafür, dass der mittlerweile international anerkannte Lie auch in seinem Heimatland eine angemessene Unterstützung erfuhr. Das norwegische Parlament beschloss 1872, eine außerordentliche Professur für ihn einzurichten. Von 1886 bis 1898 lebte Lie mit seiner Familie in Leipzig als Mathematikprofessor in der Nachfolge Felix Kleins, in engem Kontakt mit den damaligen deutschen mathematischen Zentren Berlin und Göttingen und deren Protagonisten.

Im Jahr 1889 erlitt Lie einen schweren Nervenzusammenbruch, dessen Hintergründe kaum zu einem klaren Gesamtbild zusammenzufügen sind. Belegt sind zeitgleich auftretende familiäre Probleme, aber auch beginnende Streitigkeiten mit Mathematikerkollegen. Lie verbrachte sieben Monate in einer Nervenklinik und wurde danach als nicht geheilt entlassen. Er fand zwar im ▷

▷ Wesentlichen wieder zu seiner mathematischen Arbeitskraft, doch die Beziehungen zu seinen Kollegen und Freunden wurden durch Lies beständige Vorwürfe, man betröge ihn um seinen Ruhm und stehle seine Ideen, stark belastet. Letztendlich führte dies auch zum Bruch mit Felix Klein, der dennoch nie die Verdienste Lies in Frage stellte. Im Jahre 1898 kehrte Lie nach Norwegen zurück, wo er allerdings nur noch für kurze Zeit seiner Arbeit als Hochschullehrer nachgehen konnte. Er starb im Februar 1899 an der damals nicht heilbaren perniziösen Anämie.

Ein reichhaltiges Leben mit dramatischen Ereignissen, eine vielschichtige Persönlichkeit, zahlreiche und zugängliche Quellen – das ist Stoff genug für Biografien unterschiedlichen Charakters, von mathematisch über geistesgeschichtlich bis spannend-unterhaltsam. Leider bietet der Schriftsteller, Literaturwissenschaftler und studierte Mathematiker Arild Stubhaug nichts von alledem.

Mehr als 400 Seiten Text, fast 100 Seiten Anhang aus Anmerkungsapparat, Chronologie und akkurater Bibliografie mit Hinweis auf eine Reihe ungedruckter Quellen sowie ein umfangreicher und interessanter Bildteil sind auf den ersten Blick sehr eindrucksvoll. Aber in der Qualität bleibt der Text hinter dieser Ausstattung zurück. Trotz zahlreicher Fakten über Lies Vorfahren, seine weitläufige Familie, seinen Lebensweg und die Kulturgeschichte Norwegens, ergänzt durch ausführliche Kurzbiografien seiner Zeitgenossen, lernt man über Lie als Mathematiker nicht viel mehr, als dass er bedeutend war und mit zahlreichen Auszeichnungen bedacht wurde. Stubhaug versucht gar nicht erst einen Eindruck davon zu geben, worin »die Kühnheit seiner Gedanken« eigentlich bestand und welche Rolle sie in seiner so aufregenden Zeit spielten.

Auch der Mensch Lie bleibt seltsam konturlos. Die zahlreichen, bisweilen etwas lieblos aneinander gereihten Geschichten lassen die widersprüchliche und für seine Umwelt manchmal schwer zu verstehende Persönlichkeit Lies nur erahnen. Die psychische Instabilität, sein übermäßiges Streben nach Anerkennung wird kaum in Beziehung gesetzt zu den Stationen seiner wissenschaftlichen Arbeit. Die Umstände, die zu seinem Zusammenbruch führten, und die zerstörerischen Missverständnisse, die seine Beziehungen zu vielen Fachkollegen in dieser Zeit und danach prägten, werden keiner kritischen Analyse unterzogen.

Das Buch ist ein Denkmal für den norwegischen Nationalhelden Sophus Lie – aber kein Kunstwerk

Für ein informatives Sachbuch ist das Buch viel zu umfangreich, für eine literarische Biografie fehlt ihm der dramatische Aufbau. Es bleibt ein Denkmal für einen norwegischen Nationalhelden, der Lie ja unbestritten ist. Doch auch Denkmäler können Kunstwerke sein. Hier wurde eine Chance vertan, das reichhaltige und aufwendig recherchierte Material zu einem solchen Kunstwerk zusammenzufügen und dem Menschen und Mathematiker Lie dadurch gerecht zu werden.

Maria Reményi

Die Rezensentin ist promovierte Mathematikerin und Wissenschaftshistorikerin in Heidelberg.



VERHALTENSFORSCHUNG

Matthias Uhl und Eckart Voland

Angeber haben mehr vom Leben

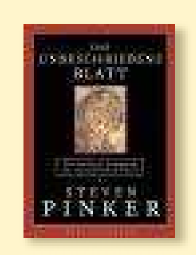
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2002. 240 Seiten, € 19,95

Es erscheint leicht, über Selbstdarsteller und Egoisten zu schreiben. Schließlich liefern die Statussymbole der Nachbarn und das Gehabe von Kollegen die nötigen Steilvorlagen. Weitaus schwieriger ist es, die evolutionären Wurzeln der Angeberei freizulegen. Matthias Uhl und Eckart Voland haben sich dieser Aufgabe gestellt. Beide arbeiten am Zentrum für Philosophie und Grundlagen der Wissenschaft an der Universität Gießen und kennen sich mit den Konzepten und Theorien der Biologie und Evolutionspsychologie aus. Über »Kosten-Nutzen-Analysen« und Begriffe wie »natürliche und sexuelle Selektion«, »offene und verdeckte Botschaft«, »demonstrativer Konsum und demonstrativer Müßiggang«, »teure Signale« und nicht zuletzt durch das »Handicap-Prinzip« wollen die Autoren verdeutlichen, wie sehr das Erbe der Evolution unser soziales und kulturelles Miteinander bis heute prägt.

Uhl und Voland verstehen unter einem Angeber keineswegs den »vollmundigen, betrügerischen Lügner und Hochstapler«. Angeber sind vielmehr »Organismen, die mit Hilfe von zuverlässigen Signalen ihrer Umwelt das Vorhandensein von verborgenen Qualitäten mitteilen«. Nur mit diesem Begriff vom »ehrlichen Angeber«, der sowohl »den wenig sympathischen Großkotz als auch den sachlich-nüchternen Zurschausteller des Faktischen« einschließt, passt das Buch zum Titel. Nur auf diese Weise lässt sich überhaupt plausibel darstellen, dass ausgerechnet Angeber mehr von Leben haben.

Ausgangspunkt aller Überlegungen ist die »Ökonomie der Natur«. Die ▷

Auf Deutsch erschienen



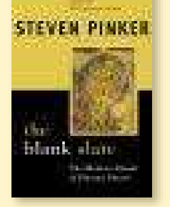
KOGNITIONSFORSCHUNG

Steven Pinker

Das unbeschriebene Blatt

Die moderne Leugnung der menschlichen Natur

Aus dem Amerikanischen von Hainer Kober.
Berlin Verlag, Berlin 2003. 713 Seiten, € 29,80



ist die Übersetzung von »The Blank Slate« (besprochen in der Februar-Ausgabe 2003).

▷ »schöne Natur« entpuppt sich nämlich bei näherem Hinsehen als »hässlicher Markt«. Verschwenderische Fülle wird nur vorgegaukelt, denn das Leben ist von Knappheit gekennzeichnet. Und Mangel führt notgedrungen zu Konkurrenz – mit dem Ergebnis: »Wo es nur einen Gewinner geben kann, werden die meisten Verlierer sein.« Die »Gewinnauszahlung« ist immer die gleiche. In der Evolution zählt einzig der gesunde Nachwuchs: »Nicht Überleben ist das primäre Ziel, sondern sich fortpflanzen.«

Die ökonomische Rationalität der Evolution macht selbst den »Nutzen des Nutzlosen« noch begreiflich. So erscheint beispielsweise der männliche Pfau zunächst als reines Luxusgeschöpf. Sein Prachtgefieder ist alles andere als effizient; es ist sogar ein Handicap. Denn es bindet Ressourcen, ist bei der Bewegung hinderlich und lockt neben den Weibchen auch Beutegreifer an. Dennoch avanciert das Pfauenrad in diesem Buch zum Paradebeispiel für das Handicap-Prinzip, und sein Träger zur Ikone des erfolgreichen Angebers.

»Offensichtlich«, so die Autoren, »führen die natürlichen Umstände nicht dazu, dass sich Lebewesen aufgrund des permanenten Mangels an Ressourcen in reine Nutzenmaximierer verwandeln.« Aber warum hat die Evolution das Pfauenrad nicht wegrationalisiert, sondern im Gegenteil immer größer und schöner werden lassen? Die Antwort lautet: Der große Ressourcenaufwand bedeutet einerseits zwar ein Handicap, macht aber andererseits das Pfauenrad zu einer »ehrlichen und fälschungssicheren Botschaft«. Dabei ist der Aufwand physiologischer Natur, das Ergebnis jedoch ein soziales – nämlich die erfolgreiche Verpaarung.

Nichts vermag einen potenziellen Sozialpartner besser von den eigenen Vorzügen zu überzeugen als ein teures Signal. Denn nur ein teures Signal ist auch fälschungssicher. Und so gibt der Pfau zuverlässig an: Hier ist ein Individuum in bester Verfassung – eines, dass es sich leisten kann, eine derartige Pracht zu entfalten.

Handicap-Signale spielen offenbar auch in der menschlichen Gesellschaft eine überragende Rolle: »Überall«, so die Autoren, »wird mit größtmöglichem Einsatz von Besitz und Fähigkeiten um Sozialpartner und Prestige gekämpft.« Die kulturelle Evolution kam überhaupt erst richtig in Gang, als unsere Vorfahren das Angeben entdeckten: »In der Wiege der Kultur lag ein Angeber.«

Uhl und Voland betonen, »dass der Handicap-Ansatz in erster Linie nicht deutlich macht, was im Bewusstsein von Menschen vor sich geht, sondern dass er evolutionär entstandene Strategien aufzeigt«. Seit der Steinzeit hat sich in Sachen Handicap-Prinzip nichts Neues getan. Trotz »kulturhistorisch neuester Erfindungen« weisen unsere sozialen Signale eine bemerkenswerte »biohistorische Kontinuität« auf.

Das Handicap-Prinzip mag zur Erklärung beitragen; als Erklärung für alles ist es untauglich

Wir werden somit zwar als geborene Angeber entlarvt, doch glauben die Autoren, dass die schlichte »Funktionslogik« unserer sozialen Kommunikation »für uns Menschen durchaus keine Schmach sein muss, sondern vielmehr ein Gefühl der Geborgenheit, der Einbettung in die Natur vermitteln kann«.

Uhl und Voland argumentieren spannend und unterhaltsam und bestechen darüber hinaus durch humorvolle Frische. Dennoch bleiben Zweifel, ob es sich bei ihrem Buch um eine »ehrliche Angabe« handelt.

Gewiss, die Grundposition der Autoren, dass es sich bei dem, »was wir als Natur bezeichnen, um ein ökonomisch strukturiertes System« handele, ist von beachtlichem heuristischem Wert. Es sei ihnen auch zugestanden, »das Erklärungspotenzial dieses Ansatzes als absolut zentral für das Verständnis alles Lebendigen« zu erachten. Aber in dem Bemühen, Komplexität zu reduzieren, um »die Welt besser handhabbar zu machen«, gleiten sie haltlos in den strikten Monismus ab: »Alles in unserer menschlichen Kultur ist Frucht der Mechanismen des Handicap- und des Nützlichkeitsprinzips.« Um diesen Satz aufrechtzuerhalten, müssten die Autoren die Leistungen der menschlichen Kultur schon bis zur Unkenntlichkeit uminterpretieren.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle. ◁

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Albrecht Unsöld, Bodo Baschek
Der neue Kosmos
7. Auflage, Springer, Berlin 2002,
590 Seiten, € 49,95

Die siebte Auflage des seit 1967 herausgegebenen Buches »Der neue Kosmos« gilt als das beste wissenschaftliche Astronomiebuch in deutscher Sprache – zu Recht.

Für Studenten ist es der ideale Begleiter zur Prüfungsvorbereitung. Kein anderes Buch kann die gleiche Vollständigkeit garantieren. Und für alle, die beruflich mit Astronomie oder Astrophysik zu tun haben, ist »Der neue Kosmos« wegen seiner thematischen Breite und Vollständigkeit ebenfalls ein Muss. Zu fast jeder Frage findet man eine Erklärung in diesem Buch.

»Der neue Kosmos« schafft den Spagat, Lehrbuch und Nachschlagewerk in einem zu sein.

Aus der Rezension von Stefan Gillessen

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Didaktik	■■
Suchen/Finden	■■■■
Lesespaß	■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	18

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

Eine Frage des Alters

Von Pierre Tougne

»Wärst du doppelt so alt wie ich und noch siebzehn Jahre älter, dann wäre mein Alter ein ganzzahliger Teiler deines Alters«, sagt Karl. »Stimmt«, entgegnet ihm Pia, »und mein Alter würde deines teilen, wenn du vier Jahre älter wärst.« Auf welche Kombinationen aus Lebensaltern passt dieser Dialog? Man beachte: Vielleicht ist Karl oder Pia (oder beide) ja frühreif; aber älter als ein Jahr sind sie schon.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei schwebende Magnetkugelschreiber »U.F.O. Pen«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. Januar 2004, eingehen.

Die Auflösung der Jubiläumspreisrätsel

Kreuzworträtsel September 2003:

		P		L			F			B		V		E	S	
	P	O	L	Y	M	E	R	A	S	E	H	E	R	S	C	H
P	O	L	Y	N	O	M	I	W	A	R	E	T	S	P	H	
	L	Y	S	E	R	G	S	A	E	U	R	E	T	C	M	
L	Y	S	I	N	B	A	E	C	K	E	R	R	A	B	E	
	T	I	N	N	I	T	U	S	U	H	M	A	T	R	I	X
P	O	L	Y	E	D	E	R	D	L	R	A	B	I	E	S	
	P	A	T	R	I	C	I	A	A	P	N	A	S	H	S	
K	A	N	T	E	T	A	S	T	R	U	N	K	T	M	F	
	L	U	R	I	A	H	O	E	R	N	E	R	I	A	L	
	L	E	I	D	E	N	M	I	N	K	O	W	S	K	I	
G	E	M	U	E	T	E	E	G	S	T	R	E	C	K	E	
	L	I	M	N	A	N	R	E	G	U	N	G	H	U	G	O
		L									A				E	

Das Lösungswort ist TREIBHAUSEFFEKT. Die Gewinner der ersten drei Preise sind Helga Erpenbach, Karlsruhe (die Uhr »Kairos« von Chronoswiss); Werner Haubensak, Lörrach, und Hartmut Fenner, Hamburg (je eine Tischdestille).

Kreuzworträtsel Oktober 2003:

		A				K		S		K		H					
	A	R	C	H	A	E	O	P	T	E	R	Y	X	T	A	U	
E	S	C	H	E	R	I	Z	I	E	G	E	P	E	R	R	O	N
	P	H	E	R	O	M	O	N	R	E	S	O	N	A	N	Z	
	A	A	L	Z	E	B	R	A	P	L	U	T	O	N	I	U	M
	R	E	A	K	T	A	N	D	E	N	L	E	N	S	K	I	
	A	A	T	L	U	H	M	A	N	N	T	N	T	M	A	D	E
	G	A	P	A	N	N	E	L	I	D	A	U	R	I	N	E	
S	I	R	U	P	G	R	O	T	T	E	T	S	A	T	U	R	N
	N	I	L	P	E	A	N	O	A	U	G	E	E	T	H	Z	
D	L	A	V	E	R	K	A	N	N	T	U	R	N	E	R	E	
	A	D	E	L	H	E	I	D	I	E	S	O	E	R	G	E	L
	I	N	R	I	A	T	V	D	U	R	S	L	E	Y	P		
S	E	E	A	D	L	E	R	T	M	O	B	E	L	I	X		
					T					N							

Das Lösungswort ist CHAOSTHEORIE. Die Gewinner der ersten vier Preise sind Andreas Klußmann, Erlangen (die Uhr »Kairos« von Chronoswiss); Andrea Beck, München, und Jutta Fenzl, Bühl (je ein Heronsring); sowie Detlef Roßbach, Erlangen (Replik der Erstausgabe der »Encyclopædia Britannica«).

Kreuzworträtsel November 2003:

		J	S				T			P	O			J			F			
	P	O	T	E	N	Z	E	N	A	F	I	E	B	E	R	B	I	E	R	
O	R	G	A	S	M	U	S	E	L	A	S	T	O	M	E	R	C	K	W	
	I	G	N	O	B	E	L	U	T	H	E	O	R	E	T	I	K	E	R	
	G	I	F	T	O	C	A	T	A	L	A	N	A	N	H	E	D	R	A	L
	O	N	O	E	T	H	E	R	I	B	U	E	R	G	E	R	E	R	D	E
A	G	G	R	E	S	S	I	O	N	A	P	P	E	N	D	I	X	K	O	
	I	N	D	U	C	E	R	N	E	U	R	O	L	O	G	E	T	I	R	
K	N	I	E	R	H	E	O	L	O	G	I	E	A	M	E	S	R	D	N	A
	E	R	I	K	A	I	N	A	P	A	L	M	T	O	R	N	A	D	O	
	E	G	E	N	F	S	P	E	R	M	A	B	I	N	O	M	N	I	K	E
	V	E	R	A	T	M	E	N	E	M	B	O	O	P	E	R	O	N	A	
V	A	N	I	L	L	E	I	G	N	A	Z	L	N	I	M	B	A	U	M	
	A	D	E	L	I	E	M	E	S	Q	U	I	T	E	E	T	H	I	K	
	E	S	C	H	E	R	I	C	H	I	G	E	A	L	R	A	U	N	E	
							N													

Das Lösungswort ist AKKRETIONSSCHEIBE. Die Gewinner der ersten vier Preise sind Georg Henneges, Bad Schönborn (die Uhr »Kairos« von Chronoswiss); Jörn Weichert, Cottbus (das LX10-Teleskop); sowie Tobias Schmitt-Manderbach, München, und Christian Herpich, Naila (je eine Designleuchte).

Und die Gesamtlösung?

»Cubum autem in duos cubos, aut quadrato-quadratum in duos quadrato-quadratos, et generaliter nullam in infinitum ultra quadratum potestatem in duos eiusdem nominis fas est dividere. CUIUS REI DEMONSTRATIONEM MIRABILEM SANE DETEXI. HANC MARGINIS EXIGUITAS NON CAPERET.« (»Es ist unmöglich, einen Kubus in zwei Kuben, ein Biquadrat in zwei Biqadrate oder allgemein irgendeine Potenz außer dem Quadrat in zwei Potenzen desselben Exponenten zu zerlegen. Hierfür habe ich einen wahrhaft wunderbaren Beweis entdeckt, aber dieser Rand ist zu schmal, ihn zu fassen.«) So schrieb Pierre de Fermat (1601 – 1665) an den Rand seiner Diophant-Ausgabe – und stellte damit die Nachwelt vor eines der hartnäckigsten Probleme aller Zeiten. Erst 1994 gelang es Andrew Wiles, zu beweisen, was als »Fermats letzter Satz« längst sprichwörtlich geworden war (Spektrum der Wissenschaft 1/1998, S. 96).

Die Gewinner der drei ersten Preise sind Sigrid Schweig, Hilden (LX200-Teleskop); Andreas Fogel, Reichenbach (Encyclopædia Britannica); und Uwe Bong, Kirchzarten (Reise nach New York).

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.



Das fliegende Auto

Kein Monat vergeht, in dem die Produktion neuer Kraftfahrzeuge nicht noch weiter wächst; es vergeht kein Jahr, in dem die Zahl der Verkehrsunfälle auf den Straßen nicht zunimmt. So sagt die Unfallstatistik ..., daß die Fortbewegung auf den Straßen ... um 50 Prozent gefährlicher ist als die Fortbewegung durch die Luft ... Und tatsächlich bemühen sich ... Konstrukteure in aller Welt darum, eine brauchbare Kombination zwischen Leichtflugzeug und Automobil zu schaffen. Ebenso ist es aber auch eine Tatsache, daß bislang alle erzielten Ergebnisse den Ansprüchen der Praxis nicht ganz genügten, und die teilweise recht abenteuerlich ausschauenden Konstruktionen verschwanden ... wieder in der Versenkung. *(Das Neue Universum, 71. Band, 1954, S. 37)*



Es flog wirklich! Auf das »normale« Auto war huckepack eine Flugzeugzelle montiert.

Die Geburt des Anrufbeantworters

Ein modernes Diktiergerät, dessen Vielseitigkeit einmalig sein dürfte, ist in dem von einer Münchner Firma konstruierten »Notaphon« geschaffen: Sein Hauptverwendungszweck liegt neben der normalen Aufnahme und Wiedergabe von Sprache und Musik darin, selbsttätig Telephongespräche entgegenzunehmen und auch automatisch wieder durchzusagen. Ist ein Notaphon an ein Telephon angeschlossen und wird ... nach dreimaligem Rufzeichen der Hörer nicht abgenommen, so fordert das Notaphon den Teilnehmer auf, die Mitteilung durchzusagen, und schaltet sich nach Gesprächsschluss wieder ab ... Die Aufzeichnungsdauer beträgt etwa eine halbe Stunde. *(Westermanns Monatshefte, 95. Jg., Heft1, 1954, S. 82)*

Die Bekämpfung der Landlungenschnecke

Frömming und Riemschneider haben die modernen Kontaktinsektizide, welche bekanntlich gegen viele Insekten so außerordentlich wirksam sind, ... untersucht. Geprüft wurden DDT-, HCH-, Dien- und E-Präparate in ihrer Wirkung, und zwar gegen unsere großen Nacktschneckenarten *Limax flavus* und *L. maximus*. Die Versuchstiere wurden ... entweder bestäubt oder bespritzt ... In allen Fällen zeigte sich die absolute Unwirksamkeit der Insektizide. Für Gewächshäuser und eingehegte Gärten ist also das Aussetzen von Kröten immer noch das sicherste und billigste Mittel, um der Schneckenplage Herr zu werden. *(Kosmos, 50. Jg., Heft 1, 1954, S. 79)*

Die Wirkung elektrischer Schläge

Nach einem Berichte des Dr. Batteli von der Universität in Genf kommt bei tötlichen Unglücksfällen infolge eines elektrischen Schlages der Tod bei verschiedenen Spannungen auf verschiedene Weise zustande ... Ströme niedriger Spannung, unter 120 Volt, ... können eine Lähmung des Herzens zur Folge haben. Dr. Batteli und Prof. Prevost haben die Entdeckung gemacht, daß durch Ströme von hoher Spannung die Herztätigkeit ... wieder in Funktion gesetzt werden kann. Aber da dieses Mittel spätestens 15 oder 20 Minuten nach erfolgtem Aussetzen der Herztätigkeit angewendet werden muß, so scheint diese Entdeckung ohne großen praktischen Wert zu sein. (*Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, 47. Jg., Nr. 5, 1904, S. 101)*

Rätselhafte Nordlichtbögen

Bereits früher hat Birkeland nachgewiesen, daß eine vollständige Ähnlichkeit zwischen den natürlichen Nordlichtbändern und gewissen leuchtenden Bändern besteht, die beim Durchgang elektrischer Ströme durch die stark verdünnte Luft von Entladungsröhren entstehen. Die Versuche mit den künstlich dargestellten Nordlichtbändern haben nun gezeigt, daß diese sich stets senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien entwickeln, wenn keine elektrostatischen Störungen auftreten. Wenn die natürlichen Nordlichtbänder als ähnliche elektrische Strombänder aufzufassen sind, ... so müssten sie sich auch senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien stellen, d.h. in der Richtung von Ost nach West. *(Der Stein der Weisen, Band 31, 1904, S. 30)*

Der Pedograph



Unter dem Namen »Pedometer« ist ... allgemein ein kleiner Apparat ... bekannt, der dazu dient, die Anzahl der in einer bestimmten Zeit zurückgelegten Schritte ... und die Länge des durchschrittenen Weges anzuzeigen ... Die nächste Vervollkommnung dieses Apparates ist nun der von Th. Ferguson erfundene Pedograph, welcher neben der Länge des zurückgelegten Weges gleichzeitig auch den genauen Verlauf desselben mit allen Krümmungen und Biegungen – vorderhand allerdings nur in der Ebene – verzeichnet ... Dabei ist besonders hervorzuheben, dass weder die Nacht ... noch Regen oder Nebel, noch z.B. die Art der Bodenbedeckung ... das geringste an der Verwendbarkeit des Instruments ändert. Nur ist auf der andern Seite nochmals daran zu erinnern, dass das Instrument auf anderer, als ebener Fläche so lange weniger genau ist, als der Träger des Instrument sich demselben gewissermassen noch nicht anzupassen vermag. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 2, 1904, S. 34)*



▶ Wohin des Wegs? Der Pedograph weiß zumindest woher.

Wie wählt man eine Fußballmannschaft?

Wenn aus einer großen Anzahl von Spielern zwei Mannschaften zusammenzustellen sind, ist es nicht immer eine gute Idee, die besten Spieler zuerst auszuwählen.

Von Dominik Zeillinger

Arnolds Blick schweift prüfend über die vor ihm stehenden Klassenkameraden. Er besitzt nun die Macht, über Glück oder Unglück zu entscheiden. Unsere Blicke kreuzen sich, und da trifft er seine erste Wahl:

»Matthias«, doch das bin nicht ich.

Jetzt ist Bernhard an der Reihe. Demonstrativ tänzle ich ein wenig vor und zurück. Auch er wählt aus:

»Sebastian«, auch das bin nicht ich.

Wieder Arnold: »Karl«, immer noch nicht ich und, um es kurz zu machen: Auch bei den nächsten Aufrufen fällt mein Name nicht.

So war es jedes Mal, wenn in der Turnstunde Fußball gespielt wurde. Zwei Schüler durften ihre Mannschaften zusammenstellen, indem sie abwechselnd von den noch »freien« Spielern einen auswählten. Es war mir damals unbegreiflich, warum ein begnadeter Ballkünstler wie ich immer als einer der letzten an die Reihe kam. Erst heute, nach einigen Semestern Mathematikstudium und der Lektüre einer Arbeit des Politologen Steven Brams, ist mir der wahre Grund bekannt.

Machen wir uns die Situation an einem einfachen Beispiel klar: Arnold (A) und Bernhard (B) haben jeweils eine Mannschaft zusammenzustellen. Zur Verfügung stehen die vier Spieler mit den Trikotnummern 1, 2, 3 und 4.

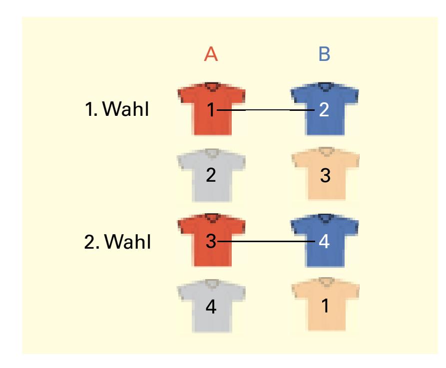
Arnold hat sehr klare Vorstellungen davon, wen er am liebsten in seiner Mannschaft haben will, nämlich die Nummer 1. Dann kommt Spieler 2, dann 3, und erst zum Schluss, wenn ihm gar nichts anderes übrig bleibt, würde Arnold den Spieler 4 wählen (das bin dann wohl ich). Arnolds Präferenzen lassen sich also in einer Wunschliste zusammenstellen; für Bernhard gilt das Gleiche. Im folgenden Bild sind beide Wunschlisten dargestellt, wobei die begehrtesten Spieler in jeder Liste ganz oben stehen.



Dass beide Listen so unterschiedlich sind, ist nicht verwunderlich, wenn man weiß, dass der Spieler 1 ein sehr guter Tormann ist. Arnold selbst ist ein guter Stürmer und braucht damit noch unbedingt einen guten Tormann in seiner Mannschaft. Hingegen ist Bernhard selbst schon Tormann und hat daher kein Interesse an Spieler 1. Ähnlich verhält es sich mit anderen Spielern. Die Stärken und Schwächen jedes Spielers sind in der Klasse bekannt; deswegen kann man auch davon ausgehen, dass Arnold Bernhards Präferenzen kennt und umgekehrt.

Die offensichtliche Wahl: die Besten zuerst

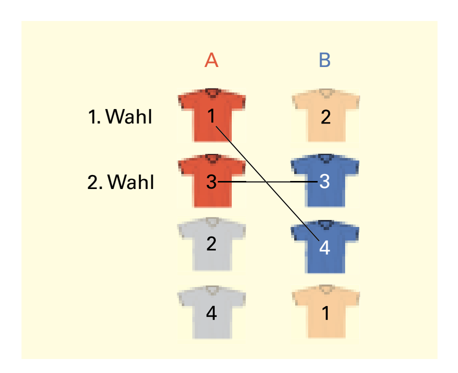
Arnold ist als Erster an der Reihe und wählt Spieler 1, der zuoberst auf seiner Wunschliste steht. Dann greift sich Bernhard seinen Favoriten, Spieler 2. Den hätte Arnold auch gerne gehabt, aber als er wieder an der Reihe ist, steht Spieler 2 nicht mehr zur Verfügung. Darum wählt er Spieler 3, und für Bernhard bleibt Spieler 4 übrig.



Das ist die »offensichtliche Strategie«: Wähle in jeder Runde unter den noch verfügbaren Spielern denjenigen aus, der in deiner Wunschliste an höchster Stelle steht. So machen es die meisten Nachwuchsfußballer. Aber auch im amerikanischen Profi-Baseball ist dieses Verfahren in den offiziellen Regeln vorgeschrieben, um junge Talente, die gerade erst ihre Schulausbildung beendet haben, auf die großen Profi-Clubs aufzuteilen. Da derjenige (in unserem Falle Arnold), der die erste Wahl hat, einen leichten Vorteil hat, darf jener Club mit der Wahl beginnen, der in der vorherigen Saison am schlechtesten abgeschnitten hat. So soll eine ausgeglichene Verteilung der Talente erreicht werden.

Geschickter: die schlaue Wahl

Aber o weh: Die offensichtliche Strategie ist nicht optimal! Wenn Arnold die Wunschliste von Bernhard kennt (und umgekehrt), kann er sich noch verbessern. Da er weiß, dass Bernhard den Tormann mit der Nummer 1 nicht will, kann er in der ersten Runde Spieler 2 wählen, ohne dass ihm Spieler 1 entgeht. Bernhard hat keine Möglichkeit, sich gegen diesen Schachzug von Arnold zu wehren. Er könnte zwar aus Trotz Spieler 1 wählen, würde sich aber damit ins eigene Fleisch schneiden. Er kann nichts Besseres tun, als in der ersten Runde Spieler 3 zu nehmen. In der zweiten Runde holt sich Arnold seinen Einser-Torwart, und Bernhard muss sich wieder mit Nummer 4 begnügen:



Arnold hat nun durch eine schlaue Strategie eine bessere Mannschaft als zuvor. Bernhard geht es entsprechend schlechter, aber er hätte nichts besser machen können. Hätte er irgendwie anders gewählt, wäre die Sache noch ungünstiger für ihn ausgegangen. Somit ist der dargestellte Ausgang des Auswahlverfahrens das, was die Spieltheoretiker ein Gleichgewicht nennen. Es ist nicht unbe-

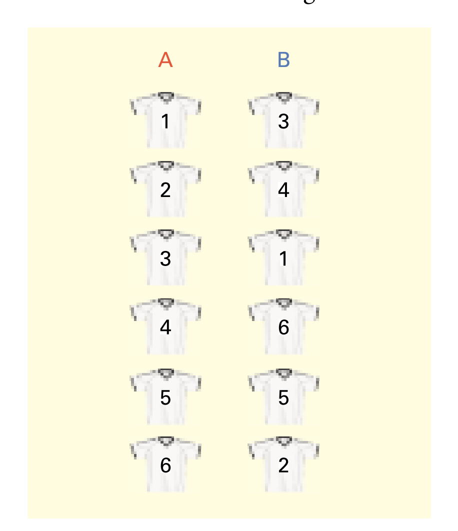
dingt die beste aller Möglichkeiten – vor allem nicht für Bernhard –, aber keiner der beiden kann seine Situation durch eine andere Strategie verbessern, wenn sein Gegner an seinem System festhält.

Wie aber trifft man eine schlaue Wahl, wenn die Situation nicht so übersichtlich ist wie in unserem Beispiel? Vor allem, wenn die Wunschliste die noch zu verteilenden zwanzig Spieler für zwei ganze Fußballmannschaften umfasst, hilft kein Herumprobieren.

Glücklicherweise lässt sich jedoch ein einfaches Rezept für eine schlaue Strategie angeben. Dabei arbeitet man sich in den Wunschlisten von unten nach oben durch. Man beginnt also nicht bei der ersten Runde, sondern überlegt sich zuerst, wie die letzte Runde aussehen wird, geht dann zur vorletzten Runde über, dann zur drittletzten und so weiter, bis man schließlich bei der ersten Runde angekommen ist.

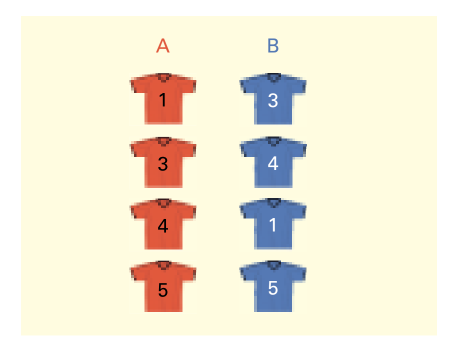
Hier ist die schlaue Strategie im Detail: Bernhards letzte Wahl wird der unterste Spieler auf Arnolds Liste sein (denn das ist genau derjenige, den Arnold Bernhard am Ende übrig lässt; er könnte aus einer anderen Wahl ja keinen Vorteil mehr ziehen). Streiche diesen Spieler aus beiden Listen. Damit erhält jeder Spieler eine reduzierte Liste. Arnolds letze Wahl wird nun der Spieler sein, der in Bernhards reduzierter Liste an letzter Stelle steht (aus demselben Grund wie oben). Streiche auch diesen. Wiederhole diese Vorgehensweise so lange, bis alle Spieler ausgewählt sind.

Für ein aussagekräftiges Beispiel brauchen wir diesmal sechs Spieler zur Auswahl. Arnold und Bernhard haben also je dreimal zu wählen, und ihre Wunschlisten sehen wie folgt aus:

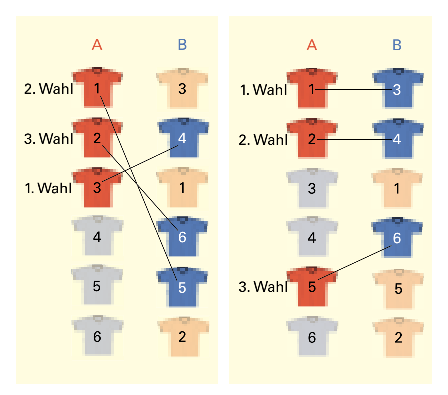


Die dritte Wahl von Bernhard wird der letzte Spieler in Arnolds Liste sein, also Spieler 6. Der wird aus beiden Listen gestrichen. Der letzte Spieler in Bernhards Liste ist nunmehr Spieler 2. Dies wird Arnolds dritte Wahl sein.

Damit haben wir das Problem auf ein kleineres mit nur vier auszuwählenden Spielern reduziert:



Nach demselben Verfahren bestimmen wir jetzt diejenigen Spieler, die in der zweiten Runde gewählt werden. Danach ergeben sich auch die Wahlen der ersten Runde. Die schlaue Vorgehensweise liefert ein Ergebnis, das der Intuition völlig widerspricht. Arnold geht es deutlich besser (links im Bild), wie beim Vergleich mit dem Ergebnis der offensichtlichen Strategie (rechts) sofort auffällt:



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

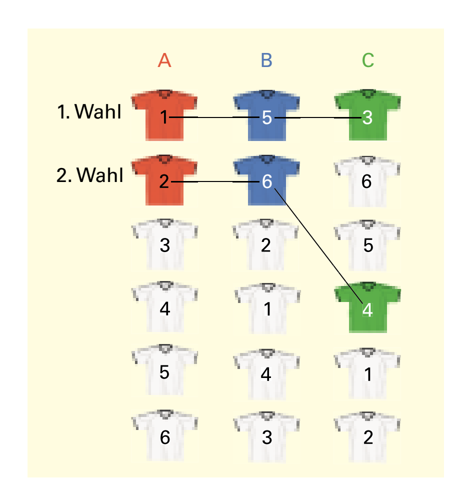
Jeder kennt die Situation aus der eigenen Schulzeit: Warten, bis einer der beiden Teamchefs (oder -chefinnen) einen aufruft und damit für würdig erklärt, in der jeweiligen Mannschaft mitzuspielen. Ein prägendes Erlebnis vor allem für diejenigen, die lange warten mussten, denn dabei wurden nicht nur sportliche Fähigkeiten, sondern auch Sympathien öffentlich bekannt gegeben!

Tatsächlich ist es nicht sehr schwierig zu beweisen, dass die schlaue Strategie für Arnold immer besser ist als die offensichtliche. Bernhard hat dann, will er nicht noch schlechter davonkommen, nur die Möglichkeit, auch eine schlaue Strategie zu verfolgen. Führen also beide eine schlaue Wahl durch, so ist das Ergebnis optimal in dem Sinn, dass keiner seine Mannschaft einseitig durch eine andere Strategie hätte verbessern können.

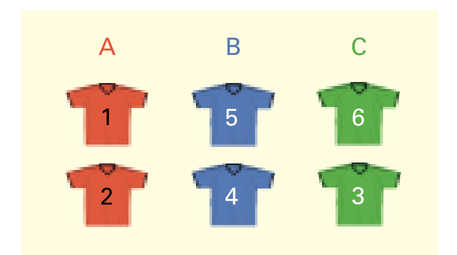
Jetzt ist auch klar, warum die besten Spieler nicht unbedingt am Anfang gewählt werden, und das Rätsel meiner Schulzeit hat sich geklärt. Mir macht nur noch die Tatsache Sorgen, dass meine Klassenkameraden, und gerade Arnold und Bernhard, in Mathematik immer schlechter waren als ich.

Das Paradox der Spielerwahl

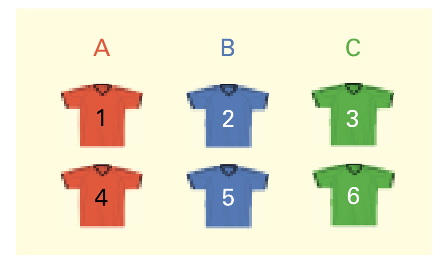
Wenn allerdings mehr als zwei Mannschaften zu bilden sind, ist die Situation noch komplizierter. Dann kann es sogar vorkommen, dass die offensichtliche Strategie für jedes Team besser ist als die schlaue. Dazu ein Beispiel, bei dem Arnold, Bernhard und Christian Mannschaften zu bilden haben. Folgendes Bild zeigt die Wunschlisten und das Ergebnis der offensichtlichen Wahl. ▷



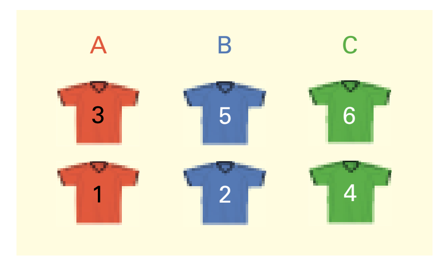
▷ Arnold und Bernhard können gar keine bessere Mannschaft haben, und auch Christian steht nicht allzu schlecht da. Aber Christian könnte, nachdem in der ersten Runde Arnold Spieler 1 und Bernhard Spieler 5 gewählt haben, Spieler 6 wählen statt Spieler 3. Dann würden sich folgende Teams ergeben:



Christian bekommt seine meistgewünschten Spieler 6 und 3, jedoch auf Bernhards Kosten, der sich mit 5 und 4 begnügen muss statt zuvor mit 5 und 6. Da überlegt sich Bernhard, was er diesem Trick von Christian entgegensetzen kann, und entdeckt, dass er in der ersten Runde besser Spieler 2 statt Spieler 5 wählt. Dann muss Christian Spieler 3 nehmen, um seine Wunschkandidaten für sich zu retten, und wir erhalten folgende Mannschaften:



So verbessert sich Bernhard im Vergleich zu vorher, und Christian stört es nicht, da sich für ihn nichts verändert. Doch nun schaut Arnold in die Röhre. Das lässt er sich natürlich nicht gefallen, wählt in der ersten Runde 3 statt 1 und verdirbt damit wenigstens Christian, der mit der Trickserei angefangen hatte, den Spaß:



Das Endergebnis ist ein Gleichgewicht; denn keiner der drei kann sich durch eine einseitige Abweichung von seiner Strategie verbessern. Das lässt sich überprüfen, indem man alle möglichen Wahlen durchprobiert. (Das ist weniger mühsam, als es scheint: Einige Wahlen sind so offensichtlich nachteilig, dass man man sie von vornherein ausschließen und sich auf die Untersuchung von 27 verbleibenden Fällen beschränken kann.) Aber das Gleichgewicht ist alles andere als optimal! Mit der offensichtlichen Strategie wären sie alle drei besser gefahren.

Dies ist einer der zahlreichen Fälle, in denen ein Gleichgewicht und ein für alle günstiger Spielausgang krass auseinander fallen; der einfachste und am intensivsten studierte Fall ist das berüchtigte Gefangenendilemma. Ähnlich wie dieses ist auch das »Paradoxon der Spielerwahl« nicht aufzulösen, ohne dass man eine der Voraussetzungen des Spiels ändert. So könnte man zulassen, dass die drei Kapitäne vorher Vereinbarungen treffen; es bleibt dann die interessante Frage, ob sie sich daran halten. Im Fall von Arnold, Bernhard und Christian hatte der Lehrer das letzte Wort, der »im Sinne aller« nach der »unsinnigen« Wahl der Schüler selbst die Mannschaften einteilte. ◁

AUTOR UND LITERATUR



Dominik Zeillinger hat an der Universität Innsbruck Mathematik studiert und arbeitet dort zurzeit als Doktorand.

Prisoners' dilemma and professional sports drafts. Von Steven J. Brams und Philip D. Straffin in: American Mathematical Monthly, Bd. 86, S. 80, 1979

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

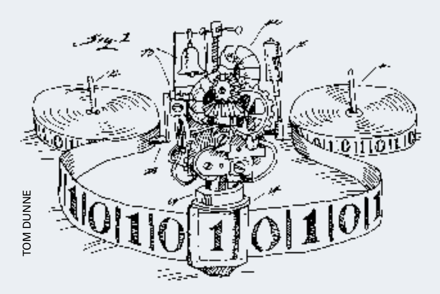
Die blühenden Indus-Städte

Während die Reiche in Ägypten und Mesopotamien durch blutige Kriege wuchsen, entwickelte sich im Indus-Tal eine Hochkultur allein dank ihrer florierenden Wirtschaft.

WEITERE THEMEN IM FEBRUAR

Computer, Paradoxa und die Grundlagen der Mathematik

Es gibt Unbeweisbares und Unberechenbares. Aber noch haben diese prinzipiellen Grenzen unseren Erkenntnisfortschritt nicht ernstlich behindert.



TOM DUNNE

Wie Säuglinge die Welt begreifen

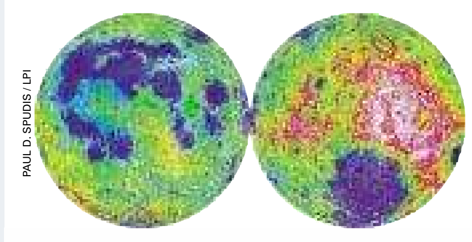
Bereits sehr früh können Kinder Sinneseindrücke miteinander verbinden. Manche elementaren Zusammenhänge müssen sie nicht erst lernen.



FLORIAN SIEGERT

Weltklima und brennende Torfwälder Indonesiens

Riesige Waldbrände der letzten Jahre in Indonesien ließen den Gehalt des Treibhausgases Kohlendioxid in der Atmosphäre erheblich ansteigen.



PAUL D. SPUDIS / LPI

Rückkehr zum Mond

Sonden kartieren die Oberfläche des Erdtrabanten, entdecken Wasservorkommen – die Mondforschung erlebt eine Renaissance.



NASA